www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Jaargang 20, 1958, no. 9 blz. 241-284 Verschenen 17 december 1958

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELEND TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

ZENDBUIZEN VOOR GEBRUIK IN DE INDUSTRIE

door E. G. DORGELO.

621.385.3

Elektronenbuizen voor het opwekken of versterken van hoogfrequente trillingen van aanzienlijk vermogen heten van oudsher zendbuizen. Deze naam hebben zij behouden in de gevallen waar van zenden geen sprake is, namelijk daar waar de trillingen worden toegepast in de industrie of in de geneeskunde. Voorbeelden van zulke toepassingen zijn het inductief en het capacitief verhitten (dit laatste ook in de vorm van diathermie). In de laatste jaren is ook meer en meer het opwekken van ultrasone trillingen in zwang gekomen, voor het ultrasoon zuiveren van vloeistoffen en oppervlakken, het ultrasoon solderen, de ultrasone materiaalbewerking, enz.). Al deze „industriële" toepassingen van zendbuizen onderscheiden zich van het gebruik in werkelijke zenders veelal hierin dat de belasting sterk wisselt en dat het bedienend personeel minder deskundig is op elektronisch gebied. Deze verschillen hebben geleid tot de ontwikkeling van speciale zendbuizen, waarbij zowel in elektrisch als in mechanisch opzicht rekening is gehouden met de omstandigheden die zich bij industrieel gebruik voordoen.*

Een zendbuis die dienst doet in een telecommunicatiezender, heeft in het algemeen een constante elektrische belasting. Hierdoor is de mogelijkheid gegeven, de aanpassing tussen de buis en de kring waaraan het vermogen wordt afgegeven, optimaal in te stellen.

Geheel anders is de toestand bij zendbuizen die gebruikt worden in „industriële" apparatuur, zoals generatoren voor inductieve of capacitieve verwarming (bij deze laatste denke men ook aan diathermie) of generatoren van ultrasone trillingen. De weerstand R_a die de buis als belasting „ziet" [1]), is in deze gevallen verre van constant; bij gevolg veranderen ook het door de buis afgegeven en het in de buis gedissipeerde vermogen in sterke mate. Uit onderzoekingen in Philips' Applicatielaboratorium voor zendbuizen is gebleken dat bij het plakken van plastiek door middel van capacitieve verwarming R_a in een bepaald geval varieerde in de verhouding 1 : 2,5, en dat bij het inductief verhitten van ijzer variaties in de verhouding 1 : 3 voorkwamen.

Door een geschikte keus van de schakeling en van de buiseigenschappen streeft men er in het algemeen naar, de veranderingen in het afgegeven vermogen zo klein mogelijk te houden. Wat betreft het in de buis gedissipeerde vermogen, mogen de hiervoor vastgestelde maxima niet worden overschreden. Behalve met het niet constant zijn van R_a, moet men rekening houden met schommelingen van de netspanning, waardoor zowel de anodevoedingsspanning als de gloeispanning soms aanzienlijk van de voorgeschreven waarde kan afwijken.

In vergelijking met de omstandigheden in telecommunicatiezenders zijn die bij gebruik van zendbuizen in de industrie dus aanzienlijk minder gunstig. In het verleden heeft men wel getracht hieraan tegemoet te komen door een groter type buis te kiezen dan voor de hand zou liggen uit een oogpunt van het gevraagde vermogen. Voorziet men b.v. een generator voor 1 kW van een zendbuis die 3 kW kan afgeven, dan is er een redelijke kans dat deze buis bij variërende belastingsweerstand en schommelende netspanning nimmer overbelast zal worden. Enige verbetering ten aanzien van het variëren van het afgegeven vermogen is daarmee echter in het algemeen nog niet verkregen.

Een meer principiële aanpak van het probleem

*) Zie b.v. E. A. Neppiras en R. D. Foskett, Ultrasone materiaalbewerking, Philips techn. T. **19**, 37-48 en 94-106, 1957 (no. 2 en no. 3), en de daarin aangehaalde literatuur.

[1]) Bij definitie is R_a het reële deel van V_{a1}/I_{a1}, als V_{a1} en I_{a1} de grondcomponent van de anodespanning resp. anodestroom in complexe schrijfwijze voorstellen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van de „industriële zendbuis" heeft geleid tot twee studies:

a) een theoretische studie van de wijze waarop de instelling van de buis verschuift als gevolg van variaties in R_a, en

b) een technologisch onderzoek om te komen tot elektrodematerialen die bij wisselende temperatuur constante eigenschappen bezitten en die elektrisch en mechanisch zwaar belast kunnen worden.

Een uitvoerig artikel over het theoretische onderzoek is elders verschenen [2]). Wij geven hier een korte samenvatting van de conclusies en gaan daarna uitvoeriger in op de technologie.

Invloed van een variërende belastingsweerstand op de instelling van de buis

Industrietriodes werken in een oscillator in de regel met een zg. automatische negatieve roosterspanning, d.w.z. tijdens het oscilleren wordt de roosterspanning telkens even positief ten opzichte van de katode; de roosterstroom die dan optreedt, vloeit door een weerstand R_g (*fig. 1*) en veroorzaakt over deze weerstand een door een condensator C_g

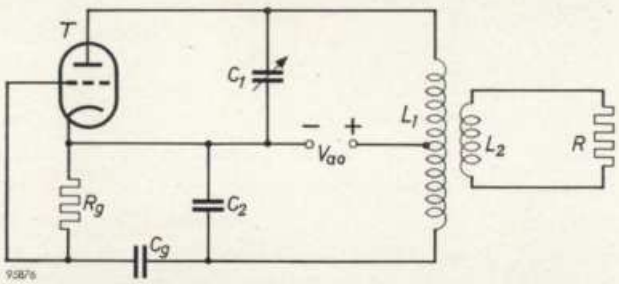


Fig. 1. Oscillatorschakeling met automatische negatieve roosterspanning. T triode. L_1-C_1 trillingskring. L_2 secundaire spoel, belast met een weerstand R. V_{a0} anodevoedingsspanning. C_2 overbruggingscondensator. R_g roosterweerstand, waarin de roosterstroomimpulsen een negatieve roosterspanning opwekken, die afgevlakt wordt door de condensator C_g.

afgevlakte spanning V_{g0}, die voor de buis een negatieve roosterspanning vormt.

Een gunstige eigenschap van deze schakeling is dat V_{g0} niet constant is, maar bij variërende R_a zich zodanig wijzigt dat veranderingen in het afgegeven vermogen P_o min of meer worden tegengewerkt. Deze compenserende werking is veelal echter verre van voldoende. Uit het bovenbedoelde theoretische onderzoek nu is gebleken dat hierbij de grootte van de versterkingsfactor μ van de triode een belangrijke invloed heeft: P_o blijkt namelijk het minst van R_a af te hangen indien μ een bepaalde waarde heeft. Hoe groot deze optimale waarde van μ is, hangt uitsluitend af van de vorm der roosterstroomkarakteristieken.

De roosterstroom komt tot stand doordat het rooster een deel van de uit de katode komende elektronen onderschept. De werkelijke roosterstroom echter is kleiner dan het onderschepte gedeelte van de katodestroom, als gevolg van secundaire emissie van het rooster [3]). De mate waarin secundaire emissie optreedt, is derhalve van invloed op de vorm van de roosterstroomkarakteristieken, en daardoor tevens van invloed op de optimale waarde van μ.

Tot voor kort werden roosters gebruikt die geheel uit één enkel metaal bestaan (wolfraam, molybdeen, tantaal), dat in de regel een vrij sterke secundaire emissie heeft. Daarbij was de gunstigste waarde van μ 30 tot 40. Moderne roosters zijn ter onderdrukking van thermische emissie bedekt met stoffen met een grote uittreearbeid; meestal is dan ook de secundaire emissie gering. Zoals in het in [2]) aangehaalde artikel is uiteengezet, is P_o het minst van R_a afhankelijk indien men zulk een rooster combineert met een waarde van μ van omstreeks 20.

Geeft men μ de optimale waarde, dan is nog een gunstige bijkomstigheid dat ook het in het rooster gedissipeerde vermogen betrekkelijk weinig met R_a varieert.

De invloed van μ blijkt voor een bepaald geval uit *fig. 2*. In deze figuur zijn het afgegeven vermogen P_o en de gemiddelde roosterstroom I_{g0} getekend als functie van R_a voor twee gelijksoortige buizen, beide met een rooster dat zeer geringe secundaire emissie vertoont, doch voor de ene buis is $\mu = 32$, voor de andere is $\mu = 18$. Laat men in P_o een variatie van +10 en −10% toe, dan mag R_a bij de buis met $\mu = 32$ slechts variëren van 1100 tot 2350 ohm, en bij de buis met $\mu = 18$ van 430 tot 2200 ohm; deze variaties in R_a zijn in de verhouding 1 : 2,1 resp. 1 : 5,1. Bovendien ziet men dat bij extreem hoge waarden van R_a (wegvallen van de belasting) de roosterstroom veel minder grote waarden aanneemt bij de buis met $\mu = 18$ dan bij de buis met $\mu = 32$.

De hier in het kort geschetste gedachtengang heeft geleid tot een reeks nieuwe zendbuistypen, speciaal ontworpen voor industrieel gebruik. Deze buizen paren een rooster met geringe secundaire emissie aan een vrij kleine μ. Aan deze combinatie is het te danken dat variaties van R_a zoals deze bij industriële toepassingen voorkomen, veel kleinere

[2]) Output and load resistance of oscillating triodes in RF heating generators, Electronic Appl. **18**, 19-26, 1957/58 (no. 1).

[3]) E. G. Dorgelo, Gitterprobleme bei Sendetrioden in Schaltungen der industriellen Elektronik, Funk-Technik **12**, 528 e.v., 1957 (no. 15).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

veranderingen in het afgegeven vermogen veroorzaken dan het geval was bij de oude zendbuizen, die een sterk secundair emitterend rooster hadden en een grote μ.

ven soort is dat het erin aanwezige aardalkalimetaal (barium) vrij sterk verdampt. Slaat dit metaal op het rooster neer, dan is het rooster in staat zelf thermisch te emitteren, vooral als het sterk belast

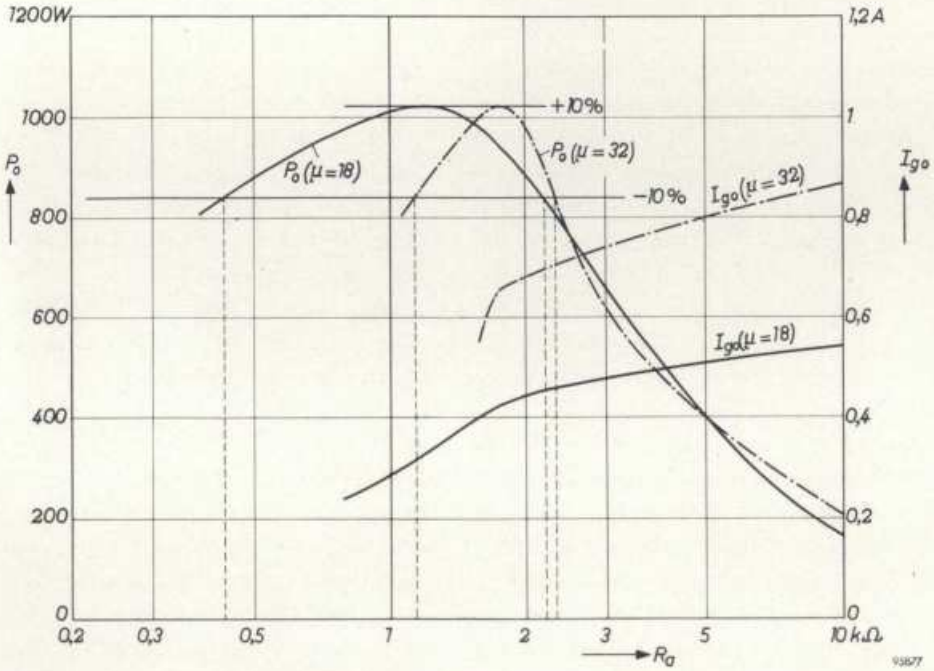


Fig. 2. Afgegeven vermogen P_o en gemiddelde roosterstroom I_{go} van een oscillerende zendtriode, als functie van de belastingsweerstand R_a, voor twee gelijksoortige buizen, beide met een rooster dat weinig secundaire emissie vertoont. Punt-streepkrommen: buis met $\mu = 32$; getrokken krommen: buis met $\mu = 18$. Om P_o binnen 10% constant te houden, moet men bij de buis met $\mu = 32$ zorgen dat R_a binnen de grenzen 1100-2350 ohm blijft (verhouding 1 : 2,1); bij de buis met $\mu = 18$ mag R_a variëren van 430 ohm tot 2200 ohm (verhouding 1 : 5). Een tweede voordeel van de lage waarde van μ is dat bij hoge waarden van R_a de roosterstroom veel kleiner blijft.

Technologie van de nieuwe buizen

De katode

Bij vergelijking van de verschillende typen katodes die thans ter beschikking staan, is voor de reeks industriële zendbuizen de keus gevallen op de katode van gethorieerd wolfraam. Weliswaar kan men met oxydekatodes en in nog sterkere mate met naleveringskatodes [4]) een veel grotere piekemissie verkrijgen, maar hieraan bestaat bij zendbuizen voor industriële doeleinden geen behoefte. Een algemeen bezwaar van oxydekatodes in zendbuizen is de relatief lage temperatuur van de katode: 1000 tot 1200 °K. De omringende elektrodes kunnen namelijk dergelijke temperaturen bereiken, en dan zou een veel te sterke „terugverhitting" van de katode ontstaan. Dit maakt oxydekatodes minder geschikt voor buizen van de hier bedoelde soort.

Een ander bezwaar van oxydekatodes en ook van naleveringskatodes in buizen van de hier beschreven dus heet is. Deze roosteremissie kan de stabiele werking van de oscillator verstoren en de levensduur van de buis verkorten. Weliswaar kan men de roosteremissie tegengaan door het rooster te voorzien van b.v. een laagje goud, maar bij de hoge temperaturen die het rooster bereikt, verdampt zulk een bedekking in korte tijd.

Gethorieerd wolfraam daarentegen heeft als katodemateriaal voor zendbuizen van de hier besproken soort grote voordelen [5]). Ten eerste is de temperatuur waarop een katode van gethorieerd wolfraam moet werken (ca. 2000 °K), zoveel hoger dan die van de omringende elektrodes dat de „terugverhitting" te verwaarlozen is. Ten tweede is de verdamping van thorium (en wolfraam) bij 2000 °K zeer gering in vergelijking met die van barium uit een oxyde- of een naleveringskatode.

Het rooster

Zelfs een zeer geringe hoeveelheid op het rooster neergeslagen thorium zou nog een hinderlijke ther-

[4]) A. Venema, R. C. Hughes, P. P. Coppola en R. Levi, Naleveringskatodes, Philips techn. T. **19**, 226-239, 1957 (no. 7/8).

[5]) Vgl. P. J. Papenhuijzen, Een zendtriode voor frequenties tot 900 MHz, Philips techn. T. **19**, 118-128, 1957 (no. 4).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

mische emissie kunnen veroorzaken. Dit wordt in de hier beschreven serie buizen voorkomen door het rooster te maken van zg. K-materiaal, d.i. een nieuw ontwikkeld materiaal met bijzonder gunstige eigenschappen. Dit materiaal heeft o.a. een hoge uittreearbeid, ook als er thorium op is neergeslagen. Het oppervlak is ruw, wat de warmtestraling bevordert. Een rooster van K-materiaal mag permanent worden belast met 25 W/cm²; daarbij is de thermische emissie, indien er thorium op het rooster is neergeslagen, slechts ca. 1 μA/cm², en na duizenden werkuren is deze waarde vrijwel niet veranderd [6]).

De zg. fysische grensbelasting — d.i. de belasting van het rooster waarbij dit onmiddellijk aan zijn eind komt — is bij K-materiaal vele malen groter dan de normale belasting. Voor één van de nieuwe buizen, de triode TB 5/2500, b.v. geldt dat het roosteringangsvermogen normaal 40 tot 70 W bedraagt; als maximum is 120 W toegelaten [7]), maar werkelijke moeilijkheden treden pas op bij 500 W.

Ter vergelijking volgen hier enige getallen voor roosters van molybdeendraad met platinamantel (het materiaal dat alom voor het tegengaan van thermische roosteremissie wordt gebruikt): bij een normale belasting van 10 W/cm² is de emissie ca. 2 μA/cm² en de maximaal toelaatbare belasting slechts 15 W/cm².

De anode

De nieuwe reeks omvat typen waarvan de anode alleen reeds door straling voldoende warmte afgeeft, alsook typen waarbij kunstmatige koeling door een lucht- of waterstroom nodig is.

De buizen met stralingskoeling hebben een anode die uit een dikwandig blok grafiet bestaat. Het grafiet is bedekt met erop vastgesinterd zirconiumpoeder, dat de straling verbetert en een goede gasbinder is. De warmtecapaciteit van de anode is zo groot dat bij intermitterend werken zware overbelastingen toelaatbaar zijn [8]). Zo mag b.v. de anodedissipatie van de TB 5/2500 bij continu werken 800 W bedragen, daarentegen bij 5 sec in en 5 sec uit: 1200 W, en bij 1 sec in en 4 sec uit: 1500 W.

De typen met water- of luchtkoeling hebben een koperen anode, die deel van de buiswand uitmaakt. In het geval van luchtkoeling is op de anode een koperen „radiator" gesoldeerd. Vroeger werd in zulke gevallen een soldeer met een vrij laag smeltpunt gebruikt (cadmium, tin, lood of een legering van deze metalen). Bij de nieuwe buizen gebruiken wij een legering van koper en zilver; het smeltpunt daarvan is zo hoog dat smelten van het soldeer door overbelasting van de buis is uitgesloten.

De metalen anodes zijn zeer dik van wand, zodat ook hier de warmtecapaciteit groot genoeg is om bij intermitterend gebruik aanzienlijke overbelastingen toelaatbaar te maken. De dikke wand heeft bovendien het voordeel dat een eventueel ongelijkmatig elektronenbombardement slechts een geringe ongelijkmatigheid in de temperatuurverdeling langs de anode tot gevolg heeft.

De elektrodes en de ballon uit mechanisch oogpunt

Daar bij industrieel gebruik van zendbuizen het gevaar van ruwe behandeling bestaat, is bij het ontwerpen van de nieuwe serie getracht de mechanische sterkte zo groot mogelijk te maken.

In zendbuizen met een katode van gethorieerd wolfraam is de katode altijd een zwak punt geweest. Niet alleen breekt deze gemakkelijk door schokken, maar ook treedt vaak een langzaam voortschrijdende deformatie op, die op den duur kan leiden tot kortsluiting tussen katode en rooster. Dit is met name het geval indien de katode vaak wordt in- en uitgeschakeld.

Uit langdurige proefnemingen is komen vast te staan dat de deformatie tot een volkomen verwaarloosbaar bedrag kan worden teruggebracht door een voldoend dikke gloeidraad te nemen waarvan de temperatuur aan de lage kant wordt gehouden. De gloeidraad van de nieuwe buizen is 1 mm dik (twee maal zo dik als in vergelijkbare buizen van ouder type). Zoals gebruikelijk, wordt de draad „gecarboniseerd", d.i. gegloeid in een koolstofhoudend gas. Aan het oppervlak ontstaan dan wolfraamcarbides, die maken dat de emissie langere tijd boven een bepaalde minimumgrens blijft dan het geval zou zijn zonder carbonisering. De carbidelaag is bij de nieuwe buizen even dik gehouden als bij de oude. Ten einde bij de verlaagde temperatuur (zie boven) toch voldoende emissie te verkrijgen, is het gloeidraadvermogen, in verhouding tot de maximale anodestroom die nodig is, aan de ruime kant gekozen.

Een verdere verbetering is bereikt door draad van andere samenstelling en andere kristalstructuur te gebruiken en deze beide nauwkeurig onder controle te houden. Deze nieuwe katodes vertonen na tienduizenden malen in- en uitschakelen geen, of een volkomen verwaarloosbare, deformatie.

[6]) Zie fig. 9 en bijbehorende tekst van het in [5]) aangehaalde artikel.

[7]) In de gegevens van Philips zendbuizen wordt tegenwoordig niet meer het maximale roosteringangsvermogen opgegeven, maar de maximale waarde van de gemiddelde roosterstroom. De reden hiervoor is dat de gebruiker het vermogen niet, maar de stroom wel kan meten.

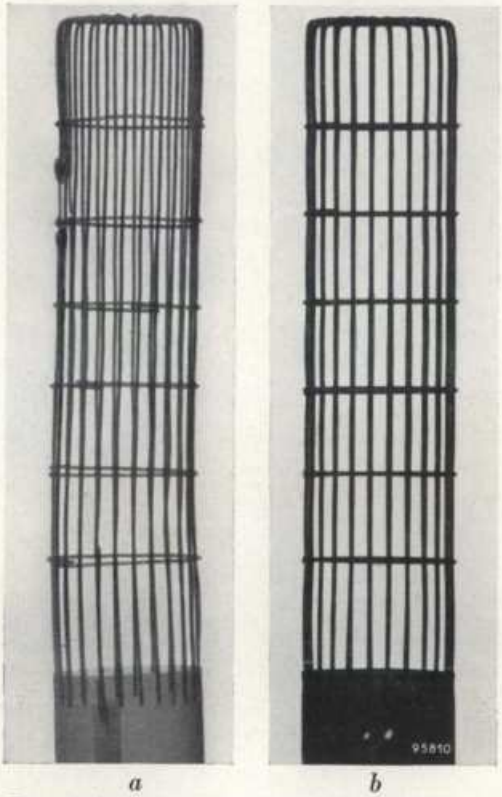
[8]) Intermittent use of oscillator tubes in RF heating generators, Electronic Appl. **18**, 41-47, 1957/58 (no. 2).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fluctuaties in de gloeispanning van —10% tot +5% van de nominale waarde blijken niet schadelijk te zijn voor de werking of de levensduur van de buis. Deze gunstige omstandigheid is waarschijnlijk hieraan toe te schrijven dat bij de dikke gloeidraad het volume (en daarmee de voorraad thorium) relatief groot is, in verhouding tot de oppervlakte van de draad, vanwaar het thorium verdampt.

Een verdere stap in de richting van schokvaste buizen is gedaan door de afstanden tussen de elektrodes — met name de afstand katode-rooster — relatief groot te nemen. Een jaar geleden nog werd van andere zijde een lans gebroken voor industriële buizen met juist kleine afstanden tussen de elektrodes [9]). Het toen gebezigde motief — grote steilheid, waardoor het roosteringangsvermogen klein kan zijn — is van elektrisch standpunt zeker juist. Wij menen echter dat het gevaar van kortsluiting bij trillen en schokken dan te groot wordt en dat men beter een grote „roosterveiligheidsfactor" kan verkrijgen door relatief grote afstanden te combineren met een zeer zwaar belastbaar roostermateriaal. In dit laatste opzicht is K-materiaal zeer gunstig.



a *b*

Fig. 3. Röntgenfoto's van twee roosters die intermitterend met 350 W werden belast. *a*) Rooster van molybdeendraad met platinamantel, na 6 uur intermitterende belasting. *b*) Rooster van K-materiaal, na 1000 uur met dezelfde belasting

[9]) W. J. Pohl, The design and operation of high-power triodes for radio-frequency heating, Proc. Instn. Electr. Engrs. **104 B**, 410-416, 1957 (no. 16).

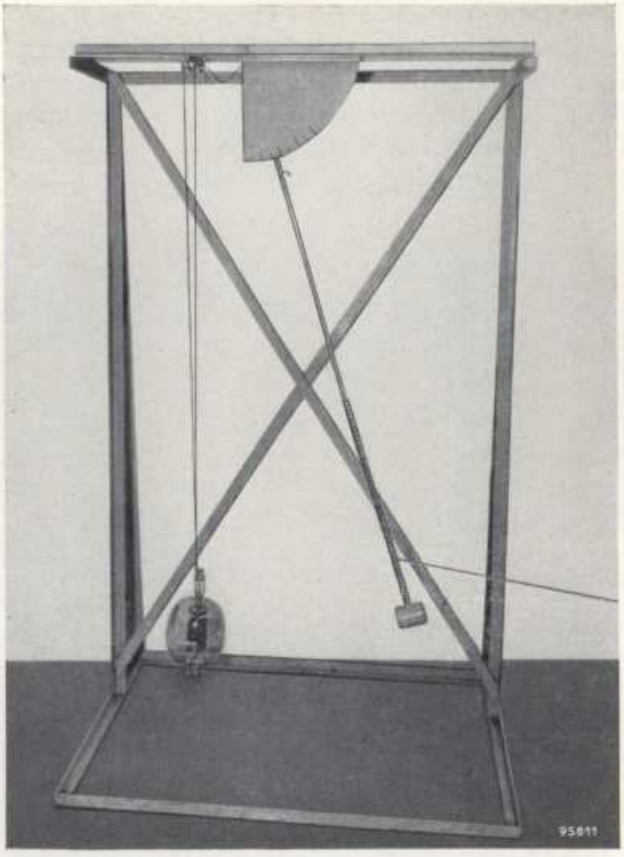


Fig. 4. Toestel voor het mechanisch beproeven van zendbuizen. Men geeft de hamer een voor ieder buistype gespecificeerde beginuitwijking en laat hem dan tegen de vrij opgehangen buis botsen. Daarbij mogen de elektrodes van de buis niet (ook niet momenteel) met elkaar in aanraking komen. De optredende versnelling is ongeveer 30 maal die van de zwaartekracht.

K-materiaal heeft bovendien de eigenschap dat het ductiel is en dus niet gemakkelijk breekt. Ook vertoont het, bij herhaaldelijk in- en uitschakelen van de gloeidraad, slechts een zeer geringe neiging tot deformatie. In *fig. 3* ziet men twee röntgenfoto's van een rooster van molybdeendraad met platinamantel (fig. 3*a*) en van een rooster van K-materiaal (fig. 3*b*). Het eerste was al na 6 uur intermitterend met 350 W belast te zijn geweest, duidelijk zichtbaar gedeformeerd, het tweede was na 1000 uur met dezelfde belasting niet noemenswaard gedeformeerd.

Bij buizen met koeling door straling is de glazen ballon meestal een kwetsbaar onderdeel. De nieuwe buizen van dit type hebben een ballon die er misschien weinig elegant uitziet, maar zeer sterk blijkt te zijn en een vrij gelijkmatige temperatuurverdeling vertoont. Dank zij dit laatste blijven de spanningen in het glas klein.

De buizen worden steekproefsgewijs mechanisch beproefd door tegen de vrij opgehangen buis een zware hamer, met een kopvlak van rubber, te laten botsen (*fig. 4*). Het traagheidsmoment, de verschil-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

lende afmetingen en de soort rubber voldoen aan de Amerikaanse militaire specificaties [10]). Eis is dat er geen contact, ook niet voorbijgaand, tussen de elektrodes optreedt wanneer de hamer een bepaalde beginuitwijking heeft gehad. Bij de TB 5/2500 b.v. is de beginuitwijking waarbij nog geen contact optreedt, 40° tot 45°; de maximale versnelling hierbij is ongeveer 30 maal die van de zwaartekracht.

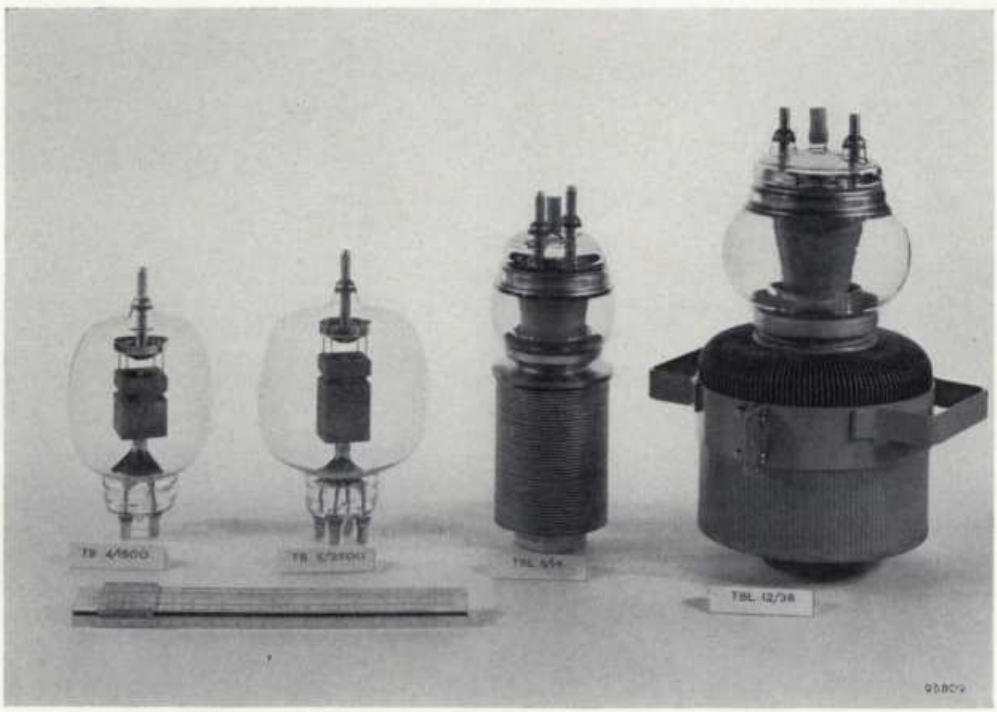


Fig. 5. De reeks zendbuizen voor industrieel gebruik. Van links naar rechts: de twee glazen buizen TB 4/1500 en TB 5/2500, en de twee metalen buizen TBL 6/14 en TBL 12/38 (voor luchtkoeling). Van de metalen buizen bestaan ook uitvoeringen voor waterkoeling (TBW 6/14 en TBW 12/38).

In alle buizen van de nieuwe reeks bevinden de doorvoeren zich in een dikwandige, van hardglas geperste, schotel. Zij zijn van kovar (een legering van ijzer, kobalt en nikkel). Het aan het glas gesmolten gedeelte van de doorvoeren is conisch van vorm en daardoor zo star dat zelfs bij krachtig wrikken aan de aansluitklemmen geen merkbare beweging van de elektrodes optreedt.

Levensduurproeven

Om een indruk te geven van de wijze waarop de levensduur van de buizen wordt onderzocht, beschrijven wij hier de schakelcyclus van de levensduurproeven met de buis TB 5/2500.

De buis oscilleert met de hoogste toegelaten frequentie (50 MHz) en de hoogste toegelaten anodevoedingsspanning (5 kV). De gloeispanning is gestabiliseerd en wordt periodiek 10% lager en 5% hoger dan de nominale waarde gemaakt. De belastingsweerstand (gloeilampen) is zo gekozen dat het opgenomen vermogen de maximale waarde heeft. Periodiek wordt de volle belasting uit- en ingeschakeld. De anode gloeit telkens na het uitschakelen nog minutenlang op zijn hoogste temperatuur na, terwijl de roosterbelasting reeds is opgelopen tot de maximale waarde. Bovendien wordt nu en dan de gehele schakeling aan de netzijde plotseling uit- en ingeschakeld.

De tijdstippen van de genoemde schakelmanipulaties zijn zo gekozen dat iedere combinatie van toestanden één maal per twee dagen voorkomt. Vóór het begin van de proef en na 1, 10, 100, 1000, 2000, enz. uur wordt de buis volledig doorgemeten. O.a. wordt daarbij de thermische roosteremissie bepaald bij een roosteringangsvermogen van 200 W, een waarde die 3 tot 5 maal zo groot is als de normale. De gevonden waarden van de roosteremissie liggen, ook na vele duizenden uren, bij ca. 300 μA.

Voornaamste gegevens van de nieuwe buizen

De reeks industriële buizen bestaat tot dusverre uit vier typen (*fig. 5*): de buizen TB 4/1500 en

[10]) Military standard test methods for electronic and electric component parts, sectie Mil-E-1B, blz. 43.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

TB 5/2500 voor maximaal 50 MHz, en de buizen TB 6/14 en TB 12/38 voor maximaal 30 MHz; een vijfde buis, voor ca. 8 kW, is nog in ontwikkeling. In onderstaande *tabel* zijn de voornaamste technische gegevens samengevat.

Voornaamste technische gegevens van de nieuwe reeks industriële zendbuizen.

Uitgangsvermogen generator kW	Buistype	Max. anodedissipatie continu kW	Max. anodedissipatie intermitt. kW	Max. anodevoed. spann. kV	Max. door buis afgegeven vermogen kW
1-1,5	TB 4/1500	0,6	1,0	5	1,7
2-2,5	TB 5/2500	0,8	1,5	5	2,7
ca. 10	TBL 6/14 *)	10	15	8	14
	TBW 6/14 *)	15	15	8	14
ca. 30	TBL 12/38 *)	15	25	13	39
	TBW 12/38 *)	25	25	13	39

*) L = luchtkoeling, W = waterkoeling.

Deze buizen zijn alle ontworpen voor een belasting die aan variaties onderhevig is. De minimale waarde van de belastingsweerstand R_a is bepaald door de maximale toegelaten anodedissipatie. De maximale waarde van R_a is bij de gebruikelijke zendbuizen beperkt door de maximale roosterbelasting, maar is hier onbeperkt. Het toegelaten roosteringangsvermogen is bij de nieuwe buizen zo groot dat men er nooit op zal vastlopen.

Samenvatting. Het toenemend gebruik van zendbuizen in de industrie (inductieve en capacitieve verhitting, generatoren van ultrasone trillingen) heeft vraag doen ontstaan naar zendbuizen die bestand zijn tegen grote variaties in de belastingsweerstand en tegen ruwe behandeling. Ter tegemoetkoming aan deze vraag is een reeks nieuwe zendtriodes ontwikkeld: de buizen TB 4/1500 en TB 5/2500 voor maximaal 50 MHz, en de buizen TB 6/14 en TB 12/38 voor maximaal 30 MHz; een vijfde buis is nog in ontwikkeling. Het zijn buizen met een zeer dikke katode van gethorieerd wolfraam van nieuwe samenstelling en gewijzigde kristalstructuur, een rooster van zg. K-materiaal (geringe thermische en geringe secundaire emissie; ductiel) en een anode met grote warmtecapaciteit. Voor het vraagstuk van de belastbaarheid van het rooster is de oplossing niet gezocht in een zo klein mogelijk roosteringangsvermogen (wat een grote steilheid zou hebben vereist, d.w.z. een hier ontoelaatbaar klein geachte afstand katode-rooster), maar in een rooster van een materiaal dat sterke elektrische belasting verdraagt (K-materiaal), gepaard met een vrij grote afstand katode-rooster. Bovendien is aan de versterkingsfactor μ de optimale waarde gegeven. Het resultaat is dat bij variaties in de belastingsweerstand in de verhouding 1 : 3 het afgegeven vermogen van de nieuwe buizen niet meer dan −10 tot +10% verandert. Het toegelaten roosteringangsvermogen is zo groot dat het nooit een beperking zal vormen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

RÖNTGENBUIZEN MET LANGE ELEKTRONENBANEN

door A. H. G. KUNTKE *).

621.386.1:537.533.3

Terwijl over de focussering van de elektronenbundel in katodestraalbuizen reeds een hele literatuur van theoretische en experimentele onderzoekingen bestaat, is over het analoge probleem in röntgenbuizen nog maar weinig gepubliceerd. Het onderhavige artikel is een bijdrage over dit onderwerp. Het beschrijft een ontwikkeling waarvan de resultaten reeds sinds een aantal jaren bij de C.H.F. Müller A.G. en bij Philips in toepassing gebracht zijn. Hoewel deze ontwikkeling slechts een speciaal geval betreft, zijn de hier gegeven beschouwingen wellicht ook in algemener verband van belang.

Het probleem van de focussering in katodestraalbuizen en röntgenbuizen

De beelden die men met röntgenstralen produceert, zijn schaduwbeelden. Om hierbij een zo groot mogelijke beeldscherpte te verkrijgen, heeft men een zo klein mogelijke stralenbron met een zo gelijkmatig mogelijke helderheid nodig. De elektronen die door de katode van de röntgenbuis worden geëmitteerd en die bij de botsing met de anode de vergaarde energie grotendeels in warmte en voor een klein deel in röntgenstraling omzetten, moeten derhalve op de anode worden gefocusseerd tot een focus van bepaalde afmetingen. Het is gewenst dat de elektronen zo gelijkmatig mogelijk verdeeld in dit focus arriveren (aan de randen mag de dichtheid eventueel iets groter zijn, aangezien op deze plaatsen de warmteafleiding iets beter is, zodat bij een geheel gelijkmatige elektronenverdeling het anodemateriaal niet overal de maximaal toelaatbare temperatuur zou bereiken).

Het probleem van de focussering van een elektronenbundel kent men ook — en wellicht beter — bij de katodestraalbuis en bij de televisieopneem- en weergeefbuizen. In zulk een buis worden de elektronen door een constante spanning versneld. De focussering wordt hier bemoeilijkt doordat de elektronen een lange weg moeten afleggen alvorens zij b.v. op het fluorescentiescherm arriveren, en doordat de bundelstroom variabel is. Hierbij komt nog de vereiste afbuiging van de bundel. Ten einde de vereiste lange slanke elektronenbundel te verkrijgen, maakt men in deze buizen gebruik van systemen met verscheidene tussenelektrodes, die men op verschillende, voor een deel regelbare, potentialen brengt [1]); in sommige gevallen gebruikt men ook focusserende magnetische velden [2]).

Bij een röntgenbuis moet — zonder dat de afmetingen van het focus hierdoor worden beïnvloed — eveneens de bundelstroom en bovendien in het algemeen ook de buisspanning regelbaar zijn. Als voorbeeld zij vermeld dat bij diagnostiekbuizen de stroom met een factor 500 en de spanning met een factor 5 moeten kunnen worden gevarieerd. Gewoonlijk echter behoeven de elektronen hier van de gloeikatode tot aan het focus slechts een korte weg af te leggen, b.v. 10 tot 20 mm, eventueel (bij röntgenbuizen voor spanningen van 200 of 300 kV) tot 50 of 100 mm. Voor normale röntgenbuizen kan men derhalve volstaan met een veel eenvoudiger focusseringssysteem dan voor een katodestraalbuis: het focusseringssysteem bestaat er slechts uit een metalen katodeblok, dat aan de kant van de anode een ronde, bekervormige of eventueel langwerpige opening bezit. In deze opening bevindt zich een gloeikatode van geschikte vorm, die met het katodeblok elektrisch is verbonden. Het katodeblok en de anode vormen een elektronenoptisch systeem van slechts twee elektrodes (*fig. 1*), waarvan de focusseringseigenschappen hoofdzakelijk worden bepaald door de vorm van de katodeopstelling. Voor de praktijk is zulk een systeem zeer gewenst, aangezien men aan de röntgenbuis, die in een geaard omhulsel is ondergebracht, de vereiste spanningen moet toevoeren via hoogspanningskabels; bij een twee-elektrodesysteem heeft men het kleinste aantal toevoeren.

Dat men bij een televisieweergeefbuis en andere katodestraalbuizen niet met een twee-elektrodesysteem kan werken, heeft nog een andere, voor de hand liggende, reden: immers, hierbij is het essentieel dat bij een constante versnellingsspanning de bundelstroom traagheidsloos kan worden bestuurd. Daartoe gebruikt men een extra-elektrode in de vorm van een cirkelvormig of cilindrisch diafragma, waaraan men een stuurspanning toevoert, die de bundelstroom meer of minder sterk afknijpt. In het algemeen wordt dus slechts een fractie van de beschikbare elektronenemissie ge-

*) C. H. F. Müller A. G., Hamburg.

[1]) Over een der laatste ontwikkelingen op dit gebied, zie J. C. Francken, J. de Gier en W. F. Nienhuis, Een pentodekanon voor televisieweergeefbuizen, Philips techn. T. **18**, 73-82, 1956.

[2]) Zie b.v. J. A. Verhoef, Focussering met ferroxdure-magneten in televisieweergeefbuizen, Philips techn. T. **15**, 168-174, 1953.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

bruikt; de gloeikatode werkt in het zogenaamde ruimteladingsgebied. In het geval van de röntgenbuis daarentegen is het enerzijds niet nodig de buisstroom traagheidsloos te kunnen variëren, anderzijds echter moet niet alleen de stroom, maar ook de spanning kunnen worden ingesteld, en wel beide onafhankelijk van elkaar. Het is daarom bij röntgenbuizen algemeen gebruikelijk de gloeikatode zijn verzadigingsstroom te laten leveren [3]). De gewenste stroom stelt men dan in door regeling van de katodetemperatuur (gloeistroomregeling).

Bij sommige röntgenbuizen voor de medische therapie en voor het industriële materiaalonderzoek is de situatie enigszins anders dan bij de gewone buizen, doordat de elektronen *niet* zulke korte wegen als boven vermeld moeten afleggen. Het focus wordt hierbij gevormd aan het einde van een lange axiale anodetuit, die men in een lichaamsholte kan steken voor de bestraling van diep liggende ziektehaarden, of in machines, b.v. voor het doorstralen van moeilijk toegankelijke gedeelten. In zulke röntgenbuizen moeten de elektronen de holle anode doorlopen in de vorm van een lange slanke bundel, die in sommige gevallen 700 mm of nog langer zijn moet. Een goede focussering is hierbij niet alleen vereist om scherpe schaduwbeelden te verkrijgen en om het buisvermogen efficiënt te gebruiken, maar ook om te vermijden dat veel warmte wordt ontwikkeld en veel röntgenstraling wordt geproduceerd op ongewenste plaatsen, zoals op de wand van de tuit of op de diafragma's.

Indien de elektronen zulke lange wegen moeten afleggen, ziet het er voor het eenvoudige twee-elektrodesysteem niet zeer hoopvol uit. In het verleden heeft men derhalve niet alleen voor sommige op zichzelf staande gevallen [4]), maar ook voor röntgenbuizen met tuitanode die in serie werden vervaardigd, zijn toevlucht genomen tot magnetische focusseringsmiddelen. Men gebruikte kleine permanente magneten of een magneetspoel die over de anodetuit werd geschoven (dus een elektromagnetische lens), om de divergerende elektronenbundel weer te doen convergeren. Bij variatie van de buisspanning moet dan, om de focussering te handhaven, het magneetveld, dat wil zeggen de stroom van de magnetische lens, telkens worden aangepast, hetgeen een onaangename complicatie betekent. Bij een pulserende buisspanning wordt het probleem nog moeilijker, doordat het magneetveld van de lens in de juiste faze mee moet pulseren.

Fig. 1. Elektrodesysteem van een röntgenbuis met draaiende anode (de wolfraamschijf in de bovenste beeldhelft) en dubbel focus. Men heeft hier een eenvoudig systeem met twee elektrodes. De katode bevat in dit geval twee cilindrische gloeispiralen, waarvan de kleinste een uiterst nauw lijnvormig focus levert (0,3 mm breed).

Houdt men zich echter iets nader bezig met de elektronenoptica van het twee-elektrodesysteem, dan vindt men dat wel degelijk de mogelijkheid bestaat (binnen bepaalde grenzen natuurlijk), hiermee lange slanke elektronenbundels te produceren. We willen hier in het kort de beschouwingen en de experimenten die tot dit resultaat hebben geleid, weergeven en enkele röntgenbuizen beschrijven die reeds een aantal jaren geleden volgens de ontwikkelde principes zijn geconstrueerd [5]).

---

[3]) We zien hier af van sommige kleine speciale toestellen, waarbij men het niet nodig acht de spanning te kunnen regelen; zie b.v. Philips techn. T. **6**, 229, 1941 en **10**, 72 e.v., 1948. Er zij nog op gewezen dat bij variatie van de stroom door middel van een stuurspanning de ligging van de zg. bundelknoop en daarmee ook de grootte van het focus een weinig verandert.

[4]) Zie b.v. J. H. van der Tuuk, Een röntgenbuis voor 1 miljoen volt, Philips techn. T. **4**, 161-170, 1939; W. Hondius Boldingh en W. J. Oosterkamp, Een 400 kV-installatie voor röntgentherapie, Philips techn. T. **8**, 105-110, 1946.

[5]) De schrijver heeft al eerder het een en ander over dit onderwerp medegedeeld in een voordracht op het Internationale Röntgencongres te Kopenhagen in 1953 en in het huisorgaan van de C. H. F. Müller A.G., „Röntgenstrahlen; Geschichte und Gegenwart", 1956. De belangrijkste resultaten en hun toepassing in een zogenaamde endotherapiebuis werden reeds in het kort weergegeven in Philips techn. T. **13**, 30 e.v., 1951.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Elektronenoptische beschouwingen

We moeten voor onze beschouwingen uitgaan van het bovengenoemde fundamentele feit dat men in een röntgenbuis de gloeikatode laat werken in het verzadigingsgebied, waarbij dus alle geëmitteerde elektronen bijdragen tot de vorming van het focus. Men is hierdoor aangewezen op de klassieke, direct verhitte, gloeikatode, bestaande uit een schroefvormige of tot een platte spiraal opgewikkelde wolfraamdraad. Oxydekatodes kan men met het oog op hun levensduur bij permanente belasting niet meer dan 1/100 van hun verzadigingsstroom laten leveren, zodat zij voor ons doel ten enen male ongeschikt zijn. Andere katodes, zoals b.v. de L-katode, komen o.a. wegens de verdamping van barium niet in aanmerking. Men komt dus tot een katodeopstelling die er in het eenvoudigste geval uitziet zoals in *fig. 2* in doorsnede is weergegeven. De opstelling bevat een nauw gespiraliseerde gloeidraad, die we in eerste benadering kunnen vervangen denken door een gesloten cilindrisch lichaam, en die zich bevindt in een gleuf van het katodeblok. De cilindrische vorm beantwoordt aan het lijnvormige focus, dat voor de meeste röntgenbuizen gewenst wordt. Als we afzien van randeffecten aan de einden van de cilinder, kunnen we het potentiaalveld tussen de katode en de anode als zuiver tweedimensioneel beschouwen. Het is in fig. 2 weergegeven door een reeks equipotentiaallijnen (snijlijnen van de equipotentiaalvlakken met het vlak van tekening). De banen die de van de gloeidraad uitgaande elektronen beschrijven, kan men het eenvoudigst experimenteel bepalen met een rubbervelmodel van het potentiaalveld, waarop men kogeltjes laat rollen [6]). Een aantal karakteristieke banen die op deze wijze experimenteel zijn gevonden, zijn in fig. 2 eveneens getekend. Bekijkt men de situatie op enige afstand van de katode, dan ziet men dat er drie hoofdbundels ontstaan: één die af-

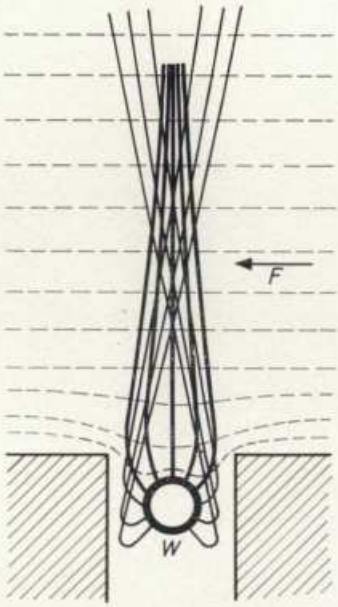


Fig. 2.

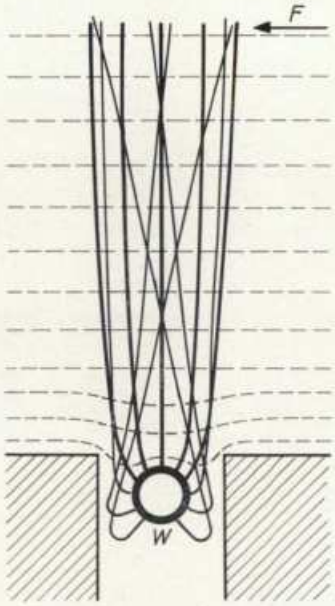


Fig. 3.

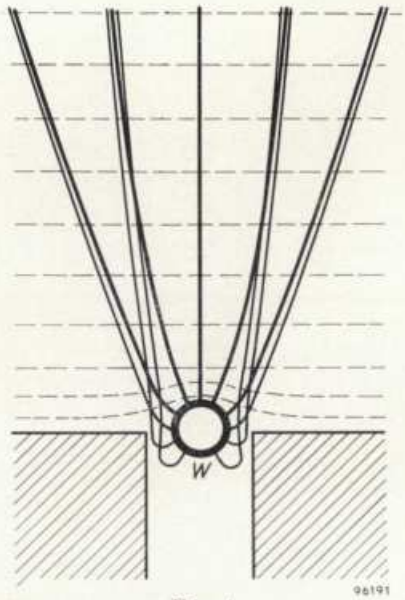


Fig. 4.

Fig. 2. Grondvorm van het katodesysteem (cilindrische gloeispiraal *W* in een gleuf), in doorsnede getekend. Een aantal equipotentiaallijnen, die in de elektrolyttrog werden bepaald, zijn gestippeld weergegeven. De getrokken lijnen zijn elektronenbanen, die werden bepaald met een sterk vergroot rubbervelmodel. Bij *F* ontstaat het focus.

Het gloeilichaam wordt hier en in het vervolg beschouwd als een gesloten cilinder. Met de elektronenemissie tussen de windingen van de draadspiraal behoeft in eerste benadering geen rekening te worden gehouden.

Fig. 3. Hetzelfde als in fig. 2, maar met een gloeilichaam dat naar de opening van de gleuf toe is verplaatst.

Fig. 4. Hetzelfde als in fig. 2 en 3, met nog verder verplaatste gloeispiraal. In de anoderuimte ontstaat nu geen focus meer.

[6]) Zie P. H. J. A. Kleijnen, De beweging van een elektron in tweedimensionale elektrostatische velden, Philips techn. T. **2**, 338-345, 1937.

Het rubbervel is voor het onderzoek van het katodesysteem van röntgenbuizen ook gebruikt door A. R. Lang en D. A. G. Broad, Electron optics of X-ray tubes and the design of unbiased sharply-focusing cathodes, Brit. J. appl. Phys. **7**, 221-226, 1956. Van een focussering op grote afstand is daar echter geen sprake.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

komstig is van het voorste derde gedeelte van de gloeikatode, en twee van de beide derde gedeelten aan de achterzijde van de gloeikatode. De stralen van elk van de laatstgenoemde bundels worden aan de zijkanten van de gleuf gespiegeld en kruisen elkaar. In het gebied ter hoogte van de pijl krijgt men een ongeveer gelijkmatige verdeling van de elektronen over de doorsnede van de bundel. Bevindt zich op deze plaats het anodeoppervlak, dan verkrijgt men hier ook het gewenste focus, met een ongeveer gelijkmatige verdeling van het elektronenbombardement en van de röntgenemittantie. Aangezien de equipotentiaalvlakken in dit gebied reeds vrijwel evenwijdig en met constante gradiënt verlopen, wordt het potentiaalbeeld niet essentieel veranderd als men de anode op dit punt dan wel iets beneden of boven de pijl aanbrengt. Zowel beneden als ook boven het aangegeven gebied echter is de elektronendichtheid ongelijkmatig, zodat in deze gebieden geen goed focus wordt verkregen. Door evenredige verandering van alle afstanden alsook van de afmetingen van gleuf en spiraal, kan men aan het verkregen focus de gewenste grootte geven.

Verplaatst men de gloeispiraal een weinig naar de opening van de gleuf toe, zoals in *fig. 3* is voorgesteld, dan gaan de drie elektronenbundels meer evenwijdig lopen, zodat het gebied van gelijkmatige elektronendichtheid verder naar buiten komt te liggen. Tevens echter wordt de totale daar verkregen bundeldoorsnede groter, zodat deze eenvoudige maatregel nog niet leidt tot het gewenste doel: het produceren van hetzelfde focus op grotere afstand. Gaat men met het verplaatsen lang genoeg door, dan treedt ten slotte, zoals men in *fig. 4* ziet, in de anoderuimte in het geheel geen gebied meer op waar alle drie hoofdbundels elkaar snijden. Ook in deze situatie echter is een focussering mogelijk, indien men het katodesysteem wat gecompliceerder maakt, terwijl het toch een twee-elektrodesysteem blijft. Een bredere gleuf of beker, aangebracht vóór het oorspronkelijke, uit gleuf en gloeispiraal bestaande, katodesysteem, en hiermee verbonden, beïnvloedt het voor de katode gelegen potentiaalveld op de wijze die in *fig. 5* is geschetst. Men ziet uit de getekende elektronenbanen dat thans wederom een focus, en wel op grotere afstand vóór de katode, kan worden verkregen.

Aangezien door de toevoeging van de katodebeker het aantal constructieparameters op zijn minst nog met twee is vergroot (breedte en diepte van de beker), is het vrijwel niet meer doenlijk het zeer grote aantal mogelijkheden door experimenten, laat staan door berekening, te overzien. Toch lukt het door een eenvoudige beschouwing, enig licht hierin te brengen en een richtlijn uit te stippelen voor de ontwikkeling van praktisch bruikbare systemen.

In de buurt van het cilindrische gloeilichaam lopen de equipotentiaalvlakken dicht langs dit lichaam. In de opening van de beker daarentegen zullen zij klaarblijkelijk een tegenovergestelde kromming bezitten, zodat daartussenin altijd een equipotentiaalvlak zal bestaan dat in een zeker gebied vrijwel vlak verloopt. De gedachte ligt voor de hand, het potentiaalveld van dit „vlakke" equipotentiaalvlak tot aan de anode, of, nauwkeuriger: in het

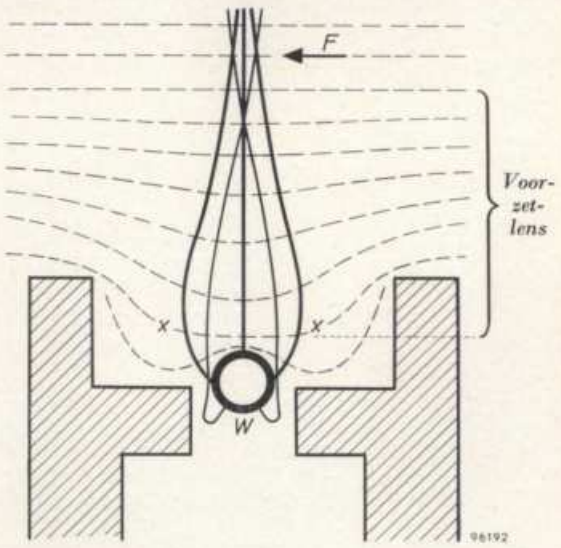


Fig. 5. Brengt men vóór de in fig. 4 weergegeven configuratie een katodebeker aan, dan krijgt men een voorzetlens (aangeduid door de accolade), die weer een focus produceert, doch nu op grotere afstand van de katode.

gebied waarin de elektronen nog worden versneld, op te vatten als een elektrostatische elektronenlens (versnellingslens), die geplaatst is vóór het elektronenoptische systeem van gloeispiraal en gleuf. Deze voorzetlens kan worden gekarakteriseerd door twee parameters, nl. het brekend vermogen en de afstand tot het eerstgenoemde systeem. Omtrent de focussering die tot stand wordt gebracht door de combinatie van de beide elektronenoptische systemen, zal men vooreerst niet veel kunnen zeggen, wegens de onoverzichtelijke situatie nabij de gloeispiraal. Heeft men echter experimenteel met behulp van het reeds genoemde rubbervel en de rollende kogeltjes de banen van de elektronen bepaald tot aan het vlakke equipotentiaalvlak, waar de voorzetlens begint, dan kan men voor het verdere onderzoek de elektronenbanen vervangen denken door hun raaklijnen in het punt waar ze het genoemde

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

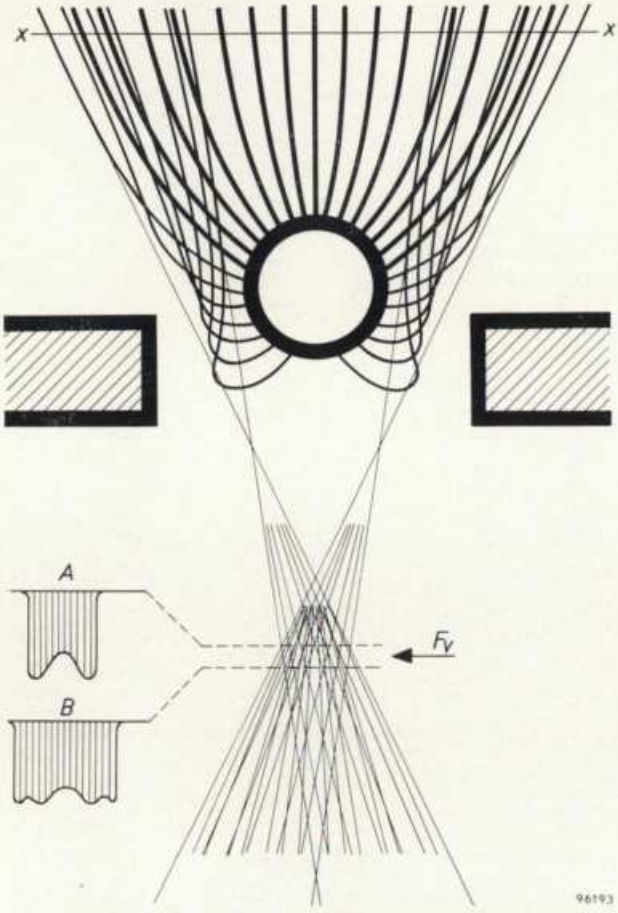


Fig. 6. Het „virtuele voorwerp" F_v dat door de voorzetlens wordt afgebeeld, is hier geconstrueerd met behulp van de raaklijnen aan de experimenteel bepaalde elektronenbanen in hun snijpunten met het vlak x-x. In de doorsneden A en B van de bundel der naar achteren verlengde raaklijnen is de verdeling van de elektronendichtheid aangegeven.

equipotentiaalvlak passeren (*fig. 6*), en men behoeft zich dus verder niet bezig te houden met de ingewikkelde dingen die nabij de gloeispiraal gebeuren. De constructie van deze raaklijnen is met bevredigende nauwkeurigheid mogelijk, aangezien de elektronenbanen ter plaatse waar ze het vlakke equipotentiaalvlak passeren, niet zeer sterk gekromd zijn, zoals men in fig. 6 ziet.

Volgt men de genoemde raaklijnen van alle elektronenbanen naar achteren (fig. 6), dan ziet men dat deze „schijnbare banen", die de elektronen zouden hebben beschreven indien de gehele ruimte achter het vlakke equipotentiaalvlak veldvrij was, weer onze drie stralenbundels vormen, die elkaar thans achter de gloeikatode, ongeveer ter hoogte van het vlak A, in een kleinste doorsnede snijden. Deze snijdingszone is op te vatten als een virtueel beeld, dat van de gloeispiraal wordt ontworpen door het elektronenoptische systeem van de gleuf. (Natuurlijk heeft men hier niet te maken met een echte afbeelding, want in ieder „beeldpunt" komen stralen uit verscheidene punten van de gloeispiraal samen.) We moeten onze voorzetlens nu zodanig dimensioneren dat van het vlak A (of eventueel van het vlak B, waarin de snijdende raaklijnen nog iets gelijkmatiger zijn verdeeld; zie de geschetste verdeling van de „elektronendichtheid" in deze vlakken) een echte, bij benadering aberratievrije, afbeelding op de anode als focus wordt verkregen. De schijnbare elektronenverdeling in het vlak A (of, bij andere instelling van de voorzetlens, het vlak B) fungeert als virtueel voorwerp [7]).

Wat men moet doen voor het oplossen van het in het begin gestelde probleem, nl. het produceren van een klein focus op zeer grote afstand van de katode, kan thans worden afgeleid uit het lichtoptische analogon. Beschouwt men aard en plaats van het virtuele voorwerp als gegeven, dan moet men een voorzetlens van klein brekend vermogen nemen die op grote afstand van dit voorwerp moet worden opgesteld (zie *fig. 7a* en *b*). In ons geval betekent dit het gebruik van een katodebeker van grote diameter en grote diepte. Aangezien men hier over twee geometrische parameters beschikt, zal het wel duidelijk zijn dat men ervoor kan zorgen dat het vlakke equipotentiaalvlak ongeveer op dezelfde plaats blijft; men voldoet dan klaarblijkelijk aan de voorwaarde dat aard en plaats van het virtuele voorwerp niet noemenswaard door de verandering van de afmetingen van de beker mogen worden beïnvloed. Anderzijds is het binnen zekere grenzen nog mogelijk door de vormgeving van de gloeikatode en de onmiddellijke omgeving daarvan invloed uit te oefenen op het (door de voorzetlens af te beelden) virtuele voorwerp, zowel wat de plaats en de afmetingen daarvan als wat de verdeling van de elektronendichtheid betreft. Hierdoor en door geschikte keuze van de afmetingen van de beker kan men aan uiteenlopende eisen voldoen ten aanzien van de grootte en de afstand van het focus en de verdeling van de belasting hierover.

---

[7]) De samenwerking van de twee delen van het potentiaalveld moet natuurlijk tot een resultaat leiden dat er onafhankelijk van is welk equipotentiaalvlak men als grens kiest. Zolang men mag afzien van afbeeldingsfouten, kan men inderdaad de constructie van de raaklijnen voor ieder willekeurig grensvlak uitvoeren, maar bij andere keuze van het grensvlak dan hier beschreven is, kan eventueel de nauwkeurigheid geringer zijn en de beschrijving van de „voorzetlens" moeilijker; zie in dit verband ook het in kleine letters gedrukte gedeelte aan het einde van deze paragraaf.

We willen nog erop wijzen dat men voor het geval van een puntvormig gloeilichaam in fig. 6 door een eenvoudige berekening kan aantonen dat in de paraxiale benadering de raaklijnen die men aan de elektronenbanen construeert in hun snijpunten met een willekeurig vlak loodrecht op de as, elkander alle exact in één punt op de as achter het gloeilichaam snijden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Al naar de gewenste afstand van het focus, kan men tot zeer aanzienlijke afmetingen van de katodebeker komen. *Fig. 8* is een schematische voorstelling van het elektrodesysteem van één der röntgenbuizen met grote focusafstand die we volgens dit principe hebben geconstrueerd, en die alle zijn gekenmerkt door de buitengewoon grote katodebeker. Het focus van deze buis ligt diep in het binnenste van de holle anode op het eindvlak hiervan. De elektronenbundel en een aantal equipotentiaalvlakken zijn in de figuur mede geschetst. De in deze figuur weergegeven elektrodeopstelling slaat op de hieronder in fig. 12 afgebeelde röntgenbuis voor het materiaalonderzoek, waarbij een focus van 0,4 mm wordt geproduceerd, terwijl de elektronen een weg van 200 mm afleggen.

Het optische analogon mag niet zonder voorbehoud worden toegepast, aangezien de „voorzetlens" in de röntgenbuis, evenals het systeem van de gloeidraad, in een bepaald opzicht geheel verschilt van optische lenzen: de stralen lopen in een ruimte met continu veranderende brekingsindex, overeenkomstig de elektronensnelheid, die naar de anode toe steeds groter wordt. Doordat men echter het „vlakke" equipotentiaalvlak beschouwt, heeft men een (virtueel) voorwerp op tamelijk grote afstand van de voorzetlens, en het beeld (het focus) wordt volgens de doelstelling ook op grote afstand geproduceerd. De variatie van de brekingsindex is dus in een betrekkelijk beperkte ruimte gecomprimeerd. Het is derhalve aannemelijk dat men het versnellende potentiaalveld door een dunne lens kan vervangen. Anderzijds heeft een gegeven lens in een aangrenzende middenstof een langere brandpuntsafstand naarmate de brekingsindex van deze stof groter is. In de anoderuimte is deze index (ten gevolge van de grotere elektronensnelheid) veel groter dan in de katoderuimte, zodat de afwijkingen van het elektronenoptische geval ten opzichte van het optische analogon voor ons doel juist in de goede richting werken.

Hoe het ook zij, als heuristisch principe heeft het optische analogon, zoals uit de constructie van een reeks röntgenbuizen met grote focusafstand blijkt, goede diensten bewezen.

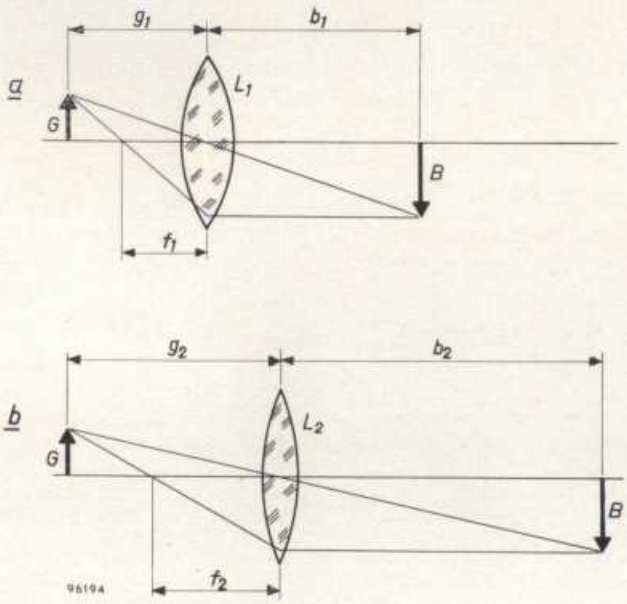


Fig. 7. Lichtoptisch analogon.
a) Van het voorwerp G, dat zich op een afstand g_1 van de dunne lens L_1 (brandpuntsafstand f_1) bevindt, wordt een enigszins vergroot beeld B op afstand b_1 ontworpen.
b) Om van hetzelfde voorwerp een k maal zo ver verwijderd, maar niet groter beeld te verkrijgen, moet men een zwakkere lens nemen (brandpuntsafstand $f_2 = kf_1$), die op k maal zo grote afstand van G moet worden geplaatst.

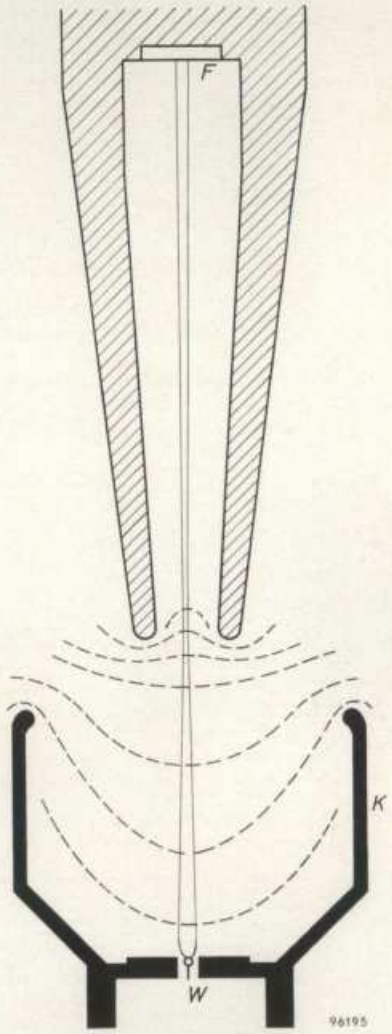


Fig. 8. Vereenvoudigde doorsnede van het elektrodesysteem van een röntgenbuis met focus op grote afstand. W gloeidraad, K katodebeker, F focus. Enkele equipotentiaalvlakken en elektronenbanen zijn getekend.

Enkele uitgevoerde röntgenbuizen met grote focusafstand

Fig. 9 toont een therapiebuis voor lichaamsholten, die in hoofdzaak reeds een aantal jaren geleden in dit tijdschrift werd beschreven (zie het in noot [5]) aangehaalde artikel). De anode is verlengd tot een tuit met een inwendige diameter van slechts 9 mm, aan het einde waarvan de elektronen in een verguld koperen plaatje worden afgeremd. In totaal doorlopen de elektronen hier een weg van 250 mm; de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

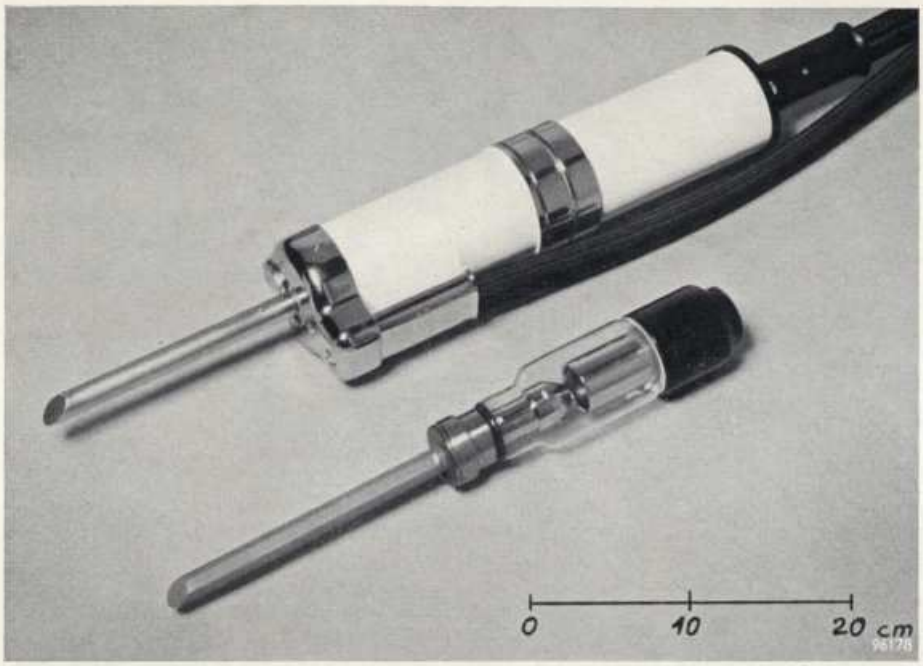


Fig. 9. Röntgenbuis met staafvormige anode voor therapeutische bestraling in lichaamsholten. De weglengte van de elektronen vanaf de gloeispiraal tot aan het focus aan het einde van de holle anodestaaf is ongeveer 250 mm.

focusdiameter is om thermische redenen tamelijk groot en bedraagt 6 mm. De kleine anodediameter maakt het mogelijk de totale dikte van de tuit aan de röntgenbuis, inclusief een mantel voor koelwater, dat de in het focus ontwikkelde warmte afvoert, te beperken tot 15 mm. De buis is daardoor voortreffelijk geschikt voor gynaecologische bestralingen en dergelijke.

In *fig. 10* ziet men een speciale buis voor het materiaalonderzoek, voor 150 kV spanning bij geaarde anode. De lange anodetuit maakt het mogelijk de röntgenstralenbron tot een diepte van ca. 65 cm binnen nauwe pijpleidingen, ketels of andere holle lichamen te brengen. De buis heeft een rond focus, zodat men een rotatiesymmetrische uitstraling verkrijgt. Legt men een röntgenfilm rondom het gedeelte van de pijpleiding dat men wil onderzoeken, dan kan men hiermee in één enkele opname de gehele omtrek van 360° van de wand van de pijp fotograferen. De weg van de elektronen heeft in

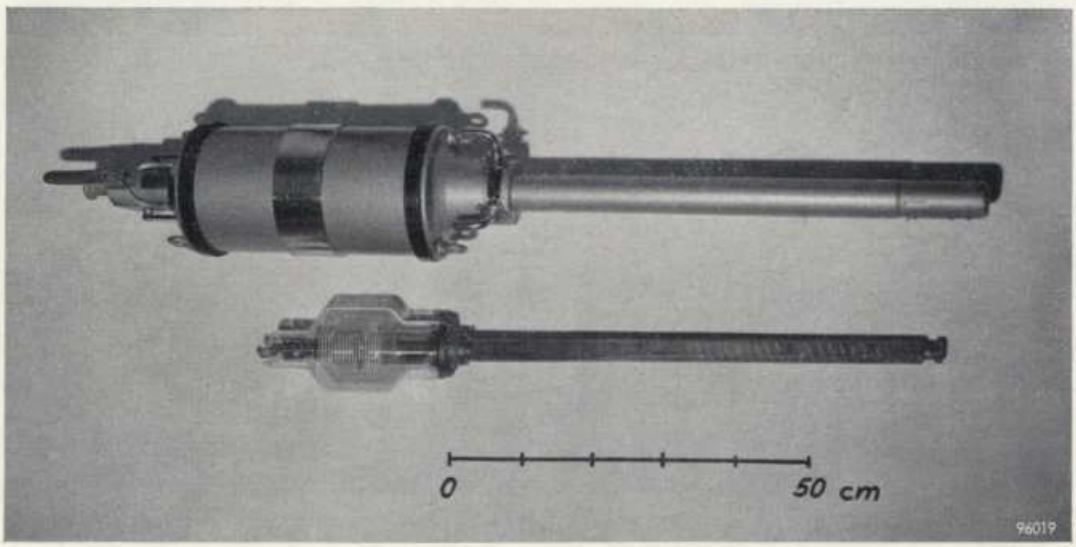


Fig. 10. Röntgenbuis voor het materiaalonderzoek, voor 150 kV bij geaarde anode. Aan het eind van de lange anodetuit ontstaat een rond focus van 5 mm diameter; lengte van de elektronenbanen 800 mm.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

deze buis een lengte van 800 mm, terwijl aan het einde van de anodetuit een focus ontstaat van slechts 5 mm diameter. De figuur laat duidelijk zien welk een grote diameter de katodebeker heeft. Om een rond focus te verkrijgen, zoals voor de hier beoogde toepassingen gewenst is, gingen we in dit geval niet uit van een cilindrische gloeispiraal, doch van een gloeidraad die tot een bolsegment was opgewikkeld (zie *fig. 11*). Ten einde te voorkomen dat elektronen die naar achteren ontsnappen, een storende halo rondom het focus doen ontstaan, is dicht bij de gloeispiraal een cilindrische afscherming aangebracht. Het schijnbaar afgebeelde voorwerp van dit systeem is — zoals men in fig. 11 ziet — wolfraamdraad als materiaal voor de gloeikatode te gebruiken, en voor een katode van wolfraamdraad bestaan in de praktijk slechts twee vormvaste constructies, nl. de schroeflijnvorm en de platte spiraal.

Op deze plaats willen we nog een andere opmerking maken. Bij alle katodeopstellingen die hierboven werden beschreven, wordt door een versnellingslens een achter de gloeikatode gelegen virtueel voorwerp afgebeeld. In principe is het echter ook mogelijk dat het virtuele voorwerp vóór de gloeikatode komt te liggen. In het geval van een katode voor een lijnfocus zou men daartoe, uitgaande van een opstelling volgens fig. 2, de gloeispiraal dieper in de gleuf moeten laten zakken; bij de katode voor een rond focus volgens fig. 11 zou men het bolsegment moeten omkeren, zodat zijn holle zijde naar de anode toe gericht is. Vervolgens moet men de voorzetlens overeenkomstig

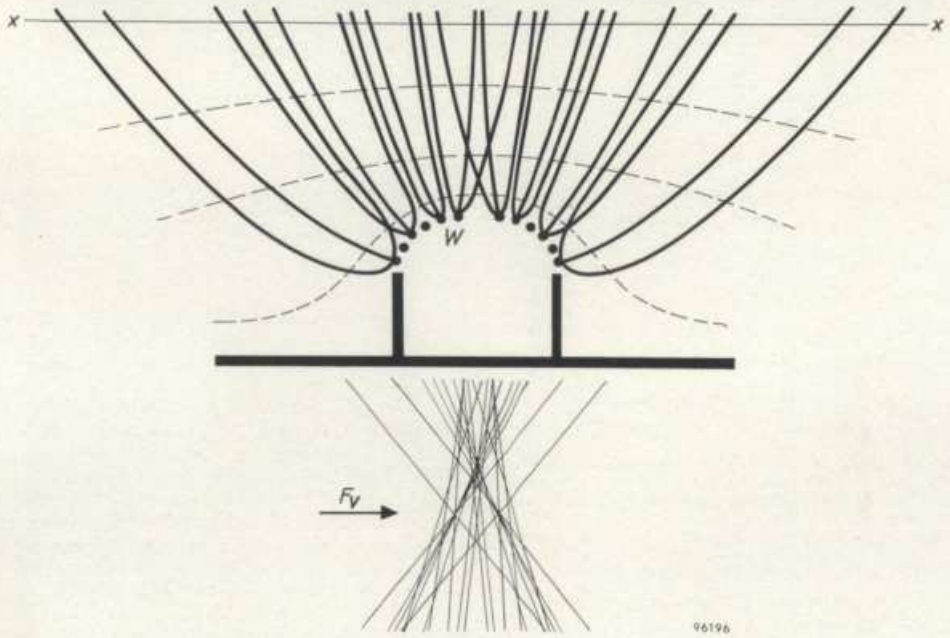


Fig. 11. Tot een bolsegment opgewikkelde gloeidraad W van de in fig. 10 weergegeven röntgenbuis. Beschouwt men de „voorzetlens" als beginnende in het vlak x-x, dan wordt bij juiste dimensionering van deze lens de nauwste doorsnede F_v van de bundel geconstrueerde raaklijnen der banen afgebeeld op de anode als focus.

weer de zone waar de naar achteren verlengde raaklijnen aan de elektronenbanen elkaar snijden. De algemene situatie, vooral wat betreft de functie van de versnellingslens, beantwoordt geheel aan hetgeen hierboven werd besproken.

Men ziet in fig. 11 ook dat de kleinste verkrijgbare doorsnede van de raaklijnenbundel bepaald wordt door de structuur van het gloeilichaam, aangezien hiermee de verschillen in uittreerichting van de elektronen samenhangen. Bij een glad katodeoppervlak zal het in principe mogelijk zijn de genoemde doorsnede, en daarmee ook het focus, aanzienlijk kleiner te maken. Omdat echter, zoals we hebben gezien, röntgenbuizen in het verzadigingsgebied van de katode werken, is het wenselijk naar voren verplaatsen, hetgeen kan worden verwezenlijkt door de katodebeker aanzienlijk dieper te maken. In het algemeen heeft dit echter het onaangename gevolg dat de veldsterkte op de gloeikatode zeer gering wordt. Daardoor werkt men bij sterke stromen en lage spanningen niet meer in het verzadigingsgebied, doch reeds in het ruimteladingsgebied, met o.a. als gevolg een ongewenste invloed van de buisstroom en de buisspanning op de afmetingen van het focus.

Opstellingen waarbij het virtuele voorwerp achter de gloeikatode ligt, vertonen dit verschijnsel niet, of pas buiten het toelaatbare gebied van stromen en spanningen; zulke opstellingen zijn dus te verkiezen.

In fig. 10 ziet men op de glazen ballon een reeks evenwijdige ringvormige strepen. Dit zijn laagjes metaal, die met gelijke afstanden op de binnenwand van de ballon zijn aangebracht. Deze ringen van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

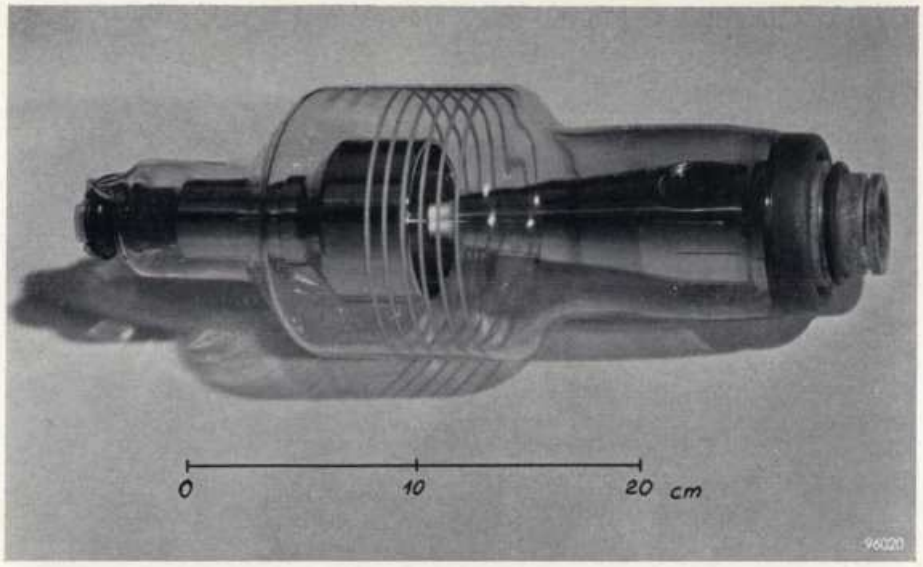


Fig. 12. Röntgenbuis voor materiaalonderzoek met dubbel focus. Weglengte der elektronen 200 mm, breedte van de beide lijnvormige focussen 2,5 en 0,4 mm.

metaal zorgen ervoor dat bij accumulatie van een lading op de glazen wand, zoals bij de hoge buisspanningen onvermijdelijk is, in ieder geval de rotatiesymmetrie van het potentiaalveld in de buis gehandhaafd blijft. Er bestaat dus geen gevaar dat het focus door radiale potentiaalverschillen opzij wordt verplaatst. Het is wel duidelijk dat een buis met dusdanig lange elektronenbanen als in dit geval bijzonder gevoelig is voor dergelijke verplaatsingen. De ringen hebben verder het voordeel dat het potentiaalverval in axiale richting gehomogeniseerd wordt, zodat geen gevaarlijk sterke gradiënten op willekeurige plaatsen van de glazen wand kunnen optreden.

Ten slotte laat *fig. 12* een eveneens voor materiaalonderzoek bestemde röntgenbuis met dubbel focus zien. De twee focussen, waarvan men er één naar keuze in werking kan stellen, zijn lijnvormig en hebben een breedte van 2,5 resp. 0,4 mm. De weg die de elektronen hier moeten afleggen, is weliswaar niet langer dan 200 mm, maar het produceren van het zeer kleine focus van 0,4 mm maakte hierbij eveneens een grote katodebeker nodig, die men in de figuur ziet en die in doorsnede in fig. 8 werd weergegeven.

Samenvatting. Terwijl in katodestraalbuizen, televisieweergeefbuizen enz. de focussering van de elektronenbundel tot stand komt door systemen met een aantal elektrodes of met behulp van magneetvelden, kan men in röntgenbuizen voor de focussering van de elektronen gewoonlijk volstaan met een systeem van twee elektrodes. In dit artikel wordt aangetoond dat dit ook nog kan indien de elektronen zeer lange wegen moeten afleggen, zoals b.v. in buizen met een anodetuit. In dat geval brengt men vóór de katode in zijn grondvorm — een gloeispiraal, geplaatst in een gleuf — een bekervormig (eventueel langwerpig) lichaam aan, dat op katodepotentiaal wordt gebracht. De aldus verkregen elektrostatische „voorzetlens" kan een achter de katode (of eventueel vóór deze) gelegen virtueel beeld van de gloeispiraal, dat door de opstelling in de gleuf is geproduceerd en dat een voldoende gelijkmatig verdeelde elektronendichtheid bezit, afbeelden op de anode. Dit virtuele beeld is voor een reeks gevallen bepaald door experimenten met een rubbervelmodel en hierover rollende kogeltjes. Uit het lichtoptische analogon leidt men de conclusie af dat voor een focus op grote afstand een voorzetlens met klein brekend vermogen vereist is, d.w.z. een katodebeker met grote diameter en grote diepte. Volgens dit principe heeft men verschillende röntgenbuizen met focus op grote afstand geconstrueerd, die in dit artikel in het kort worden beschreven. In één van deze buizen wordt aan het einde van de anodetuit een focus van 5 mm diameter geproduceerd op 800 mm afstand van de gloeikatode.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

DE SIGNAAL-RUISVERHOUDING EN DE DODE TIJD VAN EEN SCINTILLATIETELLER

door J. A. W. van der DOES de BYE. 621.387.464

Het is voor een scintillatietellerapparatuur uiteraard gewenst dat de verhouding tussen de maximale hoogten van scintillatie- en van ruisimpulsen groot is. Bovendien is het voor sommige toepassingen noodzakelijk het aantal quanta of deeltjes dat per seconde geteld kan worden, zo hoog mogelijk op te voeren. In het hier volgende artikel wordt afgeleid op welke wijze de elektronische apparatuur moet worden ontworpen om dit te bereiken en hoe men in een bepaald geval — beide eisen zijn nl. tot op zekere hoogte met elkaar in strijd — een gunstig compromis kan vinden.

Indien men met een scintillatieteller γ-quanta telt, correspondeert met ieder geabsorbeerd γ-quantum een elektrische impuls waarvan de hoogte allerlei waarden kan hebben tussen nul en een zekere maximumwaarde. Een fractie van deze impulsen zal de discriminator — die slechts impulsen doorlaat waarvan de hoogte een zekere waarde overschrijdt en die dient ter onderdrukking van de meerderheid der ruisimpulsen — niet kunnen passeren. Gegeven het type en de afmetingen van de scintillator, kan deze fractie des te kleiner zijn naarmate de hoogte van de ruisimpulsen relatief kleiner is. De verhouding tussen deze hoogte en de maximale hoogte van de scintillatie-impulsen kan men binnen zekere grenzen variëren door het ontwerp van de elektronische schakeling.

Eveneens bepaalt deze schakeling, tezamen met de door het scintillatiemateriaal gegeven flitsduur, de kleinste waarde die men redelijkerwijze kan kiezen voor de zg. dode tijd van de apparatuur, d.i. de tijd gedurende welke het telwerk niet op een nieuwe daaraan toegevoerde impuls kan reageren. Deze dode tijd bepaalt het grootste aantal quanta of deeltjes dat per seconde geteld kan worden. We zullen in dit artikel nagaan op welke wijze de elektronische schakeling de beide genoemde eigenschappen van een scintillatieteller beïnvloedt. Het zal blijken dat men deze eigenschappen niet geheel onafhankelijk van elkaar kan variëren. Uit de theorie volgt echter hoe men, bij een gegeven dode tijd, de hoogteverhouding van scintillatie- en ruisimpulsen (de zg. signaal-ruisverhouding) zo gunstig mogelijk kan maken. Ook kan men eruit afleiden welk offer men moet brengen ten aanzien van de dode tijd, om een zekere signaal-ruisverhouding te bereiken.

We zullen de berekeningen moeten baseren op de formules die het tijdsverloop van een scintillatie- en een ruisimpuls beschrijven. Ten einde eerstgenoemde formule te kunnen opstellen, beginnen we het volgende hoofdstuk met een korte recapitulatie van de wijze waarop de absorptie van een γ-quantum in de scintillator via het scintillatie-effect aanleiding geeft tot het optreden van een impuls.

De scintillatie-impulsen en de ruis aan de ingang van de versterker

De scintillatie-impulsen

Zoals in een vorig artikel [1]) reeds werd uiteengezet, geeft een γ-quantum dat in wisselwerking treedt met het scintillatiemateriaal, zijn energie E_0 geheel of gedeeltelijk af aan één of meer elektronen. De afgegeven energie E_1 geven de genoemde elektronen weer in kleine porties over aan andere, waarbij excitatie optreedt in de scintillator. Een aantal van de laatstgenoemde elektronen keert naar de grondtoestand terug onder emissie van een lichtquantum. De lichtquanta die op de absorptie van één γ-quantum volgen, vormen gezamenlijk het flitsje. Een grote fractie ervan kan in een goede telleropstelling de fotokatode van de multiplicatorbuis bereiken. Lang niet alle quanta echter die op de fotokatode vallen, geven aanleiding tot emissie van een in het dynodesysteem terechtkomend foto-elektron.

Uit het voorgaande blijkt dat de energie E_i die gemiddeld door een γ-quantum aan de scintillator moet worden afgegeven opdat er één nuttig elektron door de fotokatode wordt geëmiteerd, aanzienlijk groter is dan de genoemde porties waarin de primair vrijgemaakte elektronen hun energie afgeven. De

[1]) J. A. W. van der Does de Bye, Philips techn. T. **20**, 209-220, 1958 (no. 8). We zullen dit artikel hier aanduiden met I.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

waarde van E_i, de zg. vrijmakingsenergie, bedraagt voor het meest gebruikte scintillatiemateriaal, NaI(Tl), niet minder dan ca. 450 eV (en is voor dit materiaal onafhankelijk van E_1).

Zij g de stroomversterkingsfactor van de multiplicatorbuis, ε de lading van het elektron en t de tijd, dan wordt de vorm van de stroomimpuls die na absorptie van een γ-quantum door de buis wordt afgeleverd, gegeven door de formule [2]):

$$i'(t) = \frac{g\,\varepsilon}{\tau_0}\,\frac{E_1}{E_i}\,e^{-t/\tau_0}. \quad . . . . \quad (1)$$

Hierin is τ_0 nog de tijd die het exponentiële verloop van de intensiteit van een flitsje karakteriseert [3]). De breuk E_1/E_i is gelijk N_0, d.i. het aantal in het dynodesysteem terechtkomende elektronen dat uit de fotokatode werd vrijgemaakt [4]).

De door deze stroomimpuls veroorzaakte spanningsimpuls over de anode-impedantie, die bestaat uit een parallelschakeling van de weerstand R_a en de (parasitaire) capaciteit C_a, heeft de vorm:

$$V'(t) = \frac{g\,\varepsilon}{C_a}\,\frac{E_1}{E_i}\,\frac{\tau_1}{\tau_0-\tau_1}\left\{e^{-t/\tau_0} - e^{-t/\tau_1}\right\}. \quad . . \quad (2)$$

Hierin is $\tau_1 = R_aC_a$. De maximumwaarde van V', d. i. de impulshoogte, is:

$$V_m' = \frac{g\,\varepsilon}{C_a}\,\frac{E_1}{E_i}\left(\frac{\tau_1}{\tau_0}\right)^{\frac{\tau_0}{\tau_0-\tau_1}}. \quad . . . . \quad (3)$$

Deze maximumwaarde ligt ook bij gegeven E_i en g blijkbaar niet vast. Indien τ_1/τ_0 toeneemt, doet V_m' dat eveneens: voor grote τ_1/τ_0 nadert de vorm in τ_0 en τ_1 tot de waarde 1, maar de impuls duurt dan zeer lang, wat ongewenst is in verband met de dode tijd. In *fig. 1* ziet men de vorm van de impuls voor diverse waarden van τ_1/τ_0. De vorm van de impuls die aan de uitgang van de versterker verschijnt, is niet precies gelijk aan deze, maar is nog beïnvloed door de frequentiekarakteristiek van de versterker. We komen daarop terug in het volgende hoofdstuk.

De ruis

Zoals bekend, bestaat de ruis in hoofdzaak uit impulsen die een gevolg zijn van de thermische emissie van elektronen door de fotokatode van de multiplicatorbuis (mono-elektronimpulsen). Hun aantal bedraagt enkele duizenden tot tienduizenden per seconde. Hiernaast vindt men een veel kleiner aantal polyelektronimpulsen, die vermoedelijk hun ontstaan danken aan botsingen van ionen uit het restgas tegen de fotokatode. Gezamenlijk vormen deze impulsen de zg. donkerstroom van de multiplicatorbuis.

De mono-elektron(spannings)impulsen worden beschreven door de formule:

$$V_r'(t) = \frac{g'\,\varepsilon}{C_a}\,e^{-t/\tau_1}. \quad . . . . . \quad (4)$$

Deze formule lijkt sterk op de scintillatie-impulsformule (2), met dien verstande dat τ_0 er uiteraard in ontbreekt, en dat het aantal van de fotokatode

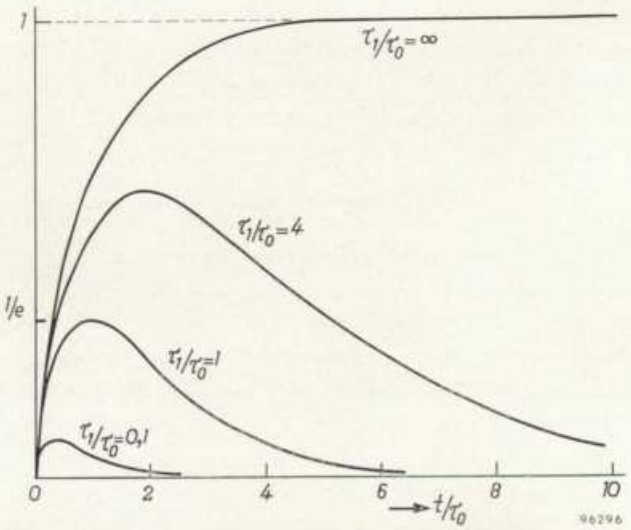


Fig. 1. De vorm van scintillatie-impulsen in afhankelijkheid van de verhouding tussen de tijdconstanten van de flits (τ_0) en van de anodeketen van de fotomultiplicatorbuis (τ_1). Verticaal is het rechterlid van formule (2) uitgezet (met een zodanige ordinaatschaal dat de impulshoogte voor het geval $\tau_1/\tau_0 = \infty$ gelijk één is) en horizontaal de tijd t in eenheden τ_0. Men kan τ_1/τ_0 noch zeer groot noch zeer klein maken. In het eerste geval duren de impulsen te lang, in het tweede treden moeilijkheden op die later besproken zullen worden.

vertrekkende elektronen (daar E_1/E_i) hier gelijk één is. Verder treft men in de formule de grootheid g' aan, de versterkingsfactor van de multiplicatorbuis, waarvan de waarde voor mono-elektronimpulsen sterk fluctueert. De gemiddelde waarde van g' is gelijk aan die van de in de formules (1) - (3) voorkomende grootheid g. De hoogte van de impuls is $g'\varepsilon/C_a$. Door het fluctueren van g' is deze hoogte dus niet voor alle impulsen dezelfde; de ruis vertoont integendeel een relatief breed impulshoogtespectrum.

De discriminatorstand V_{d_1} waarbij gemiddeld juist één ruisimpuls per seconde wordt doorgelaten, hangt uiteraard af van de vorm van het ruisspectrum — die we voor alle gevallen gelijk willen on-

---

[2]) De stroom en spanning die gemeten worden aan de anode-impedantie van de multiplicatorbuis, duiden we aan met i' en V'; die welke we meten aan de uitgang van de impulsversterker, met i en V.

[3]) Vgl. formule (3) van I. Voor NaI(Tl) is $\tau_0 = 0{,}25$ μs.

[4]) Met het feit dat dit aantal, ook bij gelijke E_i, van impuls tot impuls wat verschilt, behoeven we in dit artikel geen rekening te houden. Hetzelfde geldt voor het fluctueren van de waarde van g, althans voor zover het scintillatie-impulsen betreft.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

derstellen — en van I_{th}, het aantal per seconde optredende ruisimpulsen [5]). In formule:

$$V_{d1}' = \frac{g\,\varepsilon}{C_a} D\,(I_{th}). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

De functie $D(I_{th})$ beschrijft hier zowel de invloed op V_{d1}' van de vorm van het ruisspectrum als van de ruisintensiteit.

De scintillatie-impulsen en de ruis aan de uitgang van de versterker

De hoogte van de scintillatie- en ruisimpulsen aan de uitgang van de impulsversterker, en de discriminatorstand waarbij per seconde nog juist één ruisimpuls wordt geteld, zouden uit de formules (3), (4) en (5) zeer eenvoudig verkregen kunnen worden indien de frequentiekarakteristiek van de impulsversterker over het gehele in aanmerking komende frequentiegebied horizontaal was; men behoefde dan in deze formules slechts een constante G, de versterkingsfactor, toe te voegen. In werkelijkheid is dit niet het geval. We zullen de werkelijk optredende situatie beschrijven door de factor G te vermenigvuldigen met een voorlopig niet nader te preciseren functie φ. We definiëren deze functie bovendien zo, dat niet alleen de invloed van de tijdconstanten die de frequentiekarakteristiek van de impulsversterker bepalen, maar óók die van τ_0 (de tijdconstante van de lichtflits) en τ_1 (de tijdconstante van de anodeketen van de multiplicatorbuis) erdoor beschreven worden. Alle tijdconstanten die de impulshoogte bepalen, komen er dus in voor. De vorm die φ aanneemt voor scintillatie- resp. ruisimpulsen, is dientengevolge niet dezelfde; ten aanzien van de laatste speelt τ_0 immers geen rol. We zullen de twee vormen van φ resp. met φ_1 en φ_2 aanduiden.

Aldus gaan de formules (3) en (5) over in:

$$V_m = \frac{G\,g\,\varepsilon}{C_a} \frac{E_1}{E_i} \varphi_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

voor de hoogte van de scintillatie-impulsen, en

$$V_{d1} = \frac{G\,g\,\varepsilon}{C_a} \varphi_2\, D(I_{th}) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

voor de eerder gespecificeerde discriminatorstand.

Zij E_{eq} de waarde van E_1 waarvoor V_m gelijk aan V_{d1} wordt, dan volgt uit (6) en (7):

$$E_{eq} = E_i\, D(I_{th})\, \varphi_2/\varphi_1. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

De waarde van E_{eq} — de energie dus van γ-quanta die bij volledige absorptie ($E_1 = E_0$) impulsen leveren met een hoogte die gelijk is aan V_{d1} — is een maat voor de signaal-ruisverhouding. Deze verhouding is gelijk aan E_0/E_{eq} en is dus omgekeerd evenredig met E_{eq}.

De invloed van E_i, van de thermische emissie en van de tijdconstanten op de waarde van E_{eq} komt in verg. (8) gescheiden voor [6]). We zien dat we, behalve naar lage waarden van E_i en $D(I_{th})$ — wat reeds bekend was —, moeten streven naar een minimum van φ_2/φ_1. Daar de tijdconstanten behalve E_{eq} — d.w.z. de signaal-ruisverhouding — ook de dode tijd van de apparatuur beïnvloeden, zullen we beide aspecten gezamenlijk behandelen in het volgende hoofdstuk.

Alvorens dit te kunnen doen, zullen we iets naders moeten zeggen over de aard van φ_1 en φ_2. Het is daartoe nodig een zekere veronderstelling te maken omtrent de frequentiekarakteristiek van de impulsversterker. We zullen aannemen dat die bij benadering gelijkvormig is met de frequentiekarakteristiek van het „integrerend" netwerk met tijdconstante τ_2 dat zich rechts in het in *fig. 2* getekende vervangingsschema bevindt. Voor de verklaring van de verdere elementen van dit schema — waarvan de samenstelling uitsluitend gebaseerd is op de mathematische analogie en geen enkele fysische pretentie

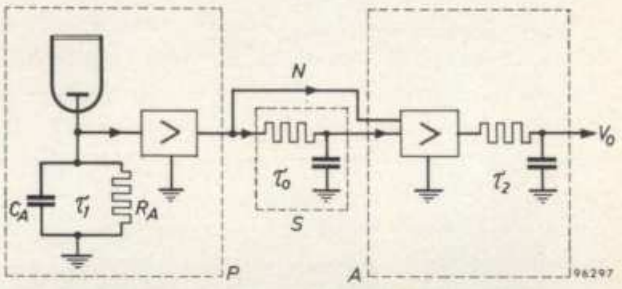


Fig. 2. Elektrisch vervangingsschema van het systeem scintillator (S) - fotomultiplicatorbuis plus anodenetwerk (P) - impulsversterker (A). De beide eerste elementen hebben resp. de tijdconstanten τ_0 en τ_1, de frequentiekarakteristiek van de impulsversterker wordt bij benadering voorgesteld door die van een integrerend netwerk met tijdconstante τ_2. Het teken $>$ betekent: van de frequentie onafhankelijke versterking. De ruis wordt geïntroduceerd door middel van een apart netwerk N parallel met S (vgl. formule (4)). De juistheid van het schema kan men als volgt verifiëren. Weglating van A levert een schema dat correspondeert met de formule (2) voor de scintillatie-impulsen aan de ingang van de versterker. Laat men bovendien S weg, dan correspondeert het resterende deel van het schema met de ruisimpulsformule (4).

[5]) De keus van één ruisimpuls per seconde is natuurlijk ietwat willekeurig. Nadere informaties omtrent de vorm van het ruisspectrum vindt men in I en in het aanhangsel van dit artikel.

[6]) Het scheiden van de invloeden van de donkerstroom en de tijdconstanten, zoals hier is gebeurd, is alleen mogelijk indien het gemiddelde tijdsverloop tussen het optreden van twee impulsen ($1/I_{th}$ dus) groot is ten opzichte van de tijdconstanten τ_n die de impulsduur bepalen, met andere woorden: de dimensieloze produkten $I_{th}\tau_n$ moeten klein zijn. Indien dit niet het geval is, hangt E_{eq} af van de waarde van deze produkten en wordt groter dan uit verg. (8) volgt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

heeft! — moge verwezen worden naar het onderschrift van de figuur. Voor frequenties $f > 1/2\pi\tau_2$ is de versterking door genoemd netwerk meer dan 3 dB kleiner dan die bij zeer lage frequenties. Daar in ons model de ondergrens van het gebied der doorgelaten frequenties bij 0 Hz ligt, is de bandbreedte van de versterker dus óók gelijk aan $1/2\pi\tau_2$.

De vorm van de functies φ_1 en φ_2

Uitgaande van de zojuist gemaakte veronderstelling, is het mogelijk formules op te schrijven voor het tijdsverloop van de scintillatie- en ruisimpulsen. De eerstgenoemde formule zal de vorm hebben:

$$V(t) = A_1 e^{-t/\tau_1} + A_2 e^{-t/\tau_1} + A_3 e^{-t/\tau_1}, \quad . \quad . \quad (9)$$

die voor de ruisimpulsen de vorm:

$$V_r(t) = B_1 e^{-t/\tau_1} + B_2 e^{-t/\tau_1}. \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

In principe zou men de functies φ_1 en φ_2 kunnen vinden, door uit de formules (9) en (10) de formules voor de hoogte van beide soorten impulsen af te leiden. Voor de ruisimpulsen, die door slechts twee e-machten beschreven worden, is dat analytisch mogelijk, voor de scintillatie-impulsen niet. De wijze waarop φ_1 varieert met de diverse tijdconstanten, kan slechts worden gevonden door numerieke berekening. Wèl kan bewezen worden dat de waarde van φ_1 — evenals trouwens die van φ_2 — slechts afhangt van de waarde van de quotiënten τ_1/τ_0 en τ_2/τ_0. We zullen deze quotiënten voortaan aanduiden door τ_1' resp. τ_2'.

Het is nuttig gebleken de numerieke resultaten in grafiek te brengen door in een figuur waarin τ_1' en τ_2' als coördinaten optreden, lijnen van constante φ te tekenen. Deze lijnen zijn dus de meetkundige plaatsen van alle combinaties (τ_1', τ_2') die tot dezelfde waarde van φ leiden. De berekening van de φ_1-lijnen is geschied met een elektronische rekenmachine [7]). In *fig. 3* vindt men de krommen voor $\varphi_1 = 0{,}10$, 0,20, 0,25, 0,30 en 0,368. De berekening van φ_2 is eenvoudiger, daar φ_2 niet van τ_0 afhangt. Een blik op het vervangingsschema leert dat τ_0 en τ_2 daarin een volkomen analoge rol spelen, d.w.z. φ_2 zal van τ_1 en τ_2 afhangen op dezelfde wijze als V_m' van τ_1 en τ_0 afhangt; zie formule (3). Zoals daar V_m' bepaald werd door de verhouding τ_1/τ_0, wordt hier φ_2 bepaald door de verhouding τ_1/τ_2 (die gelijk is aan τ_1'/τ_2'), met andere woorden: in fig. 3 zijn de lijnen van constante φ_2 rechten door de oorsprong. Voor grote τ_1' en τ_2' naderen de krommen $\varphi_1 =$ const. asymptotisch tot de rechten die voor dezelfde waarde van φ_2 gelden.

[7]) De programmering voor deze berekeningen werd uitgevoerd door A. J. W. Duijvestijn.

Signaal-ruisverhouding en dode tijd als functie van φ_1 en φ_2; de bandbreedte van de impulsversterker

In ieder punt van fig. 3, d.w.z. voor elke combinatie (τ_1', τ_2'), zijn nu de waarden van φ_1 en φ_2 bekend en daarmee ook de waarde van het quotiënt φ_2/φ_1. (Deze blijkt altijd groter dan 1 te zijn.) Het probleem van de gunstigste signaal-ruisverhouding kan dus nu zeer eenvoudig opgelost worden door op te zoeken in welk punt van het (τ_1', τ_2')-vlak het quotiënt φ_2/φ_1 minimaal is (vgl. formule 8).

De ontwerper zal zich echter dienen af te vragen of in dit geval ook de impulsduur, en daarmee de dode tijd, wel een aanvaardbare waarde krijgt, en zo neen, hoe hij de tijdconstanten moet kiezen om tot een zo gunstig mogelijk compromis te geraken.

De impulsduur, die we voor de uitgangsimpulsen zullen definiëren als de tijd gedurende welke $V(t)$ groter is dan de discriminatorstand V_d, hangt af van de impuls**vorm**, d.w.z. van alle tijdconstanten, èn van de impuls**hoogte**; zie *fig. 4*. Daar de dode tijd van een telapparaat constant dient te zijn — een variërende dode tijd zou het onmogelijk maken

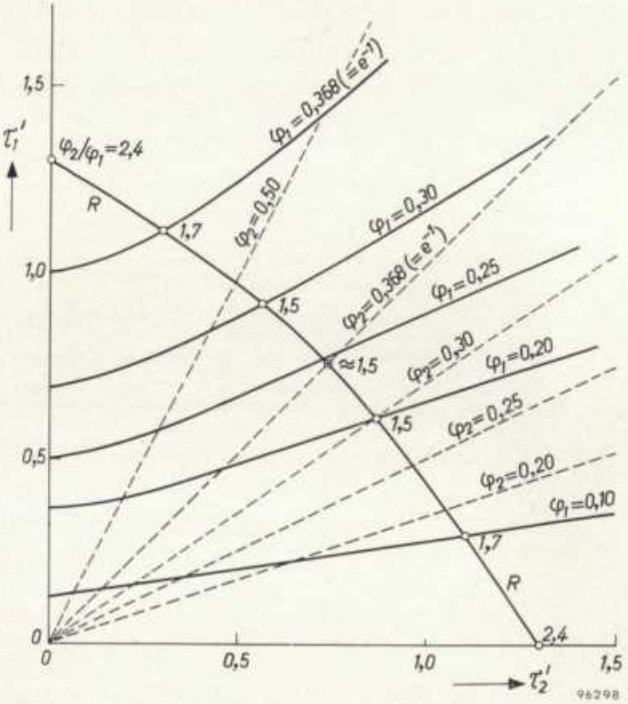


Fig. 3. Grafische bepaling van de tijdconstanten τ_1' en τ_2' met het oog op een zo gunstig mogelijke signaal-ruisverhouding. In de figuur, met abscis τ_2' en ordinaat τ_1', trekt men lijnen van constante φ_1- resp. φ_2-waarde (vgl. formules (6) en (7)). Hieruit is voor iedere combinatie van τ'-waarden de waarde van φ_2/φ_1 te berekenen. De lijnen van constante φ_2 zijn rechten door de oorsprong; voor grote coördinaatwaarden naderen de lijnen die gelden voor een zekere waarde van φ_1 asymptotisch tot die voor gelijke φ_2. Men kan ook lijnen van constante impulsduur tekenen, b.v. de kromme R in de figuur die geldt voor een impulsduur van 10 τ_0. De kleinste waarde van φ_2/φ_1, d.w.z. de gunstigste signaal-ruisverhouding, vindt men op deze krommen in de punten $\tau_1' = \tau_2'$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

om bij grote impulsdichtheden een correctie aan te brengen voor het niet getelde aantal impulsen [8]) — mag deze dus niet worden bepaald door de impulsduur. Men moet daarom de dode tijd ten minste gelijk maken aan de grootste waarde die de impulsduur kan hebben, dat wil zeggen: aan de impulsduur

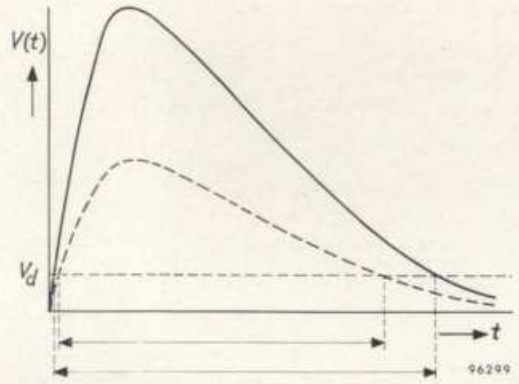


Fig. 4. De impulsduur, dat is de tijd gedurende welke $V(t)$ groter is dan de discriminatorstand V_d, is niet constant, maar hangt nog af van de impulshoogte.

van de grootste impulsen [9]). Men bereikt dit door middel van de keuze van de elektronische schakeling van het telwerk. In het volgende zullen we onder „impulsduur" steeds deze maximumwaarde verstaan.

Bij gegeven τ_0 kan méér dan één combinatie τ_1', τ_2' tot een bepaalde impulsduur leiden. De meetkundige plaats van alle combinaties τ_1', τ_2' die tot een zelfde impulsduur leiden, blijkt een kromme te zijn die er ruwweg uitziet als een kwartcirkel om de oorsprong. Men kan bewijzen dat deze kromme (bij gelijke abscis- en ordinaatschaal) symmetrisch is ten opzichte van de lijn $\tau_1' = \tau_2'$ (de „diagonaal"). Hetzelfde is het geval met het verloop van de φ_2/φ_1-waarde op deze kromme; het minimum bevindt zich steeds op de diagonaal. Men bereikt dus de gunstigste oplossing door $\tau_1' = \tau_2'$ te kiezen. De vereiste numerieke waarde der tijdconstanten hangt dan alleen af van de gewenste impulsduur.

De kromme van constante impulsduur die in fig. 3 is getekend, geldt voor een, als boven gedefinieerde, impulsduur van $10\tau_0$. Men ziet dat in dit geval de minimale waarde van φ_2/φ_1 ongeveer 1,5 is en dat deze waarde stijgt naarmate men zich langs de kromme van de diagonaal verwijdert. Op de coördinaatassen is de waarde gestegen tot 2,4.

Heeft men voor de impulsduur een keus gemaakt en de bijbehorende waarden van τ_1' en τ_2' die tot een minimumwaarde voor φ_2/φ_1 leiden, bepaald, dan liggen daarmee tevens vast: E_{eq} (zie verg. 8), de bandbreedte van de versterker (immers $2\pi f\tau_2 = 1$) en de impulshoogten. Voor de bovengekozen impulsduur komt dit neer op $f = 1$ MHz, $\varphi_2/\varphi_1 = 1{,}5$ (d.w.z. E_{eq} is $1{,}5\times$ de kleinst mogelijke waarde [10])), en ongeveer een factor 0,25 in de impulshoogte ($\varphi_1 \approx 0{,}25$; zie verg. 6).

Hoewel de frequentiekarakteristiek van de impulsversterker door de vierpool met tijdconstante τ_2 (fig. 2) slechts benaderd wordt voorgesteld — een gedetailleerder voorstelling eist een groter aantal tijdconstanten en leidt daardoor tot zeer grote moeilijkheden —, kan toch geconcludeerd worden dat:

1) een versterkerbandbreedte die groot is ten opzichte van $1/2\pi\tau_0$ een ongunstige signaal-ruisverhouding ten gevolge heeft, en
2) een versterkerbandbreedte die klein is ten opzichte van $1/2\pi\tau_0$ tot een lange dode tijd leidt.

Tot deze conclusies geraakt men snel indien men zich realiseert dat een grote bandbreedte betekent kleine τ_1' en τ_2'. Uit fig. 3 blijkt direct dat φ_2/φ_1 voor kleine τ_1' en τ_2' groot is, dus dat E_{eq} groot is en de signaal-ruisverhouding dus klein. Indien daarentegen τ_1' en τ_2' groot zijn, is φ_2/φ_1 nagenoeg gelijk aan één. Dat wil zeggen dat de signaal-ruisverhouding dan bijzonder goed is, maar de impulsduur, en daarmee de dode tijd, zeer groot (vgl. fig. 1).

De keus van impulsduur en dode tijd

Tot slot van dit hoofdstuk enige opmerkingen betreffende de keus van de impulsduur en de dode tijd. De stroomimpuls die door de fotomultiplicator wordt afgeleverd, is een groep, van de afzonderlijke foto-elektronen afkomstige, mono-elektronimpulsen. In het begin van de stroomimpuls liggen deze zeer dicht bij elkaar, maar in de „staart" wordt het gemiddeld tijdsverschil tussen de ogenblikken waarop ze optreden, steeds groter.

Indien de, door de tijdconstanten van de apparatuur bepaalde, duur der uitgangsimpulsen en de dode tijd van de orde van grootte van τ_0 (of nog kleiner) zijn, telt men een aantal van de genoemde mono-elektronimpulsen afzonderlijk. Deze impulsen zijn niet te onderscheiden van de ruisimpulsen, zodat men dus, door de impulsduur en de dode tijd te verkorten, schijnbaar de ruisintensiteit vergroot. Ten einde ook in dit geval per seconde niet meer dan

[8]) Zie hiervoor o.a. Philips techn. T. **16**, 313-324, 1954, of **17**, 300-316, 1955.

[9]) Dit zijn in de praktijk impulsen van γ-quanta van ca. 3 MeV. Daar de waarde van V_{d1} voor moderne tellers correspondeert met een E_{eq}-waarde van 10 keV, zijn deze impulsen dus ca. $300\times$ zo hoog als de discriminatorstand.

[10]) Bij een E_i-waarde van 450 eV en een $D(I_{th})$-waarde van 10 (zie aanhangsel) wordt E_{eq} in dit geval dus gelijk aan 6,75 keV (verg. 8).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

één „ruis"-impuls te tellen, moet men dus de discriminatorstand verhogen, met als gevolg dat er een grotere fractie van het aantal scintillatie-impulsen niet geteld wordt. De keuze van de dode tijd zal derhalve op een compromis berusten.

Ter illustratie hiervan zullen we nagaan hoe de situatie is wanneer men, zoals ook reeds in de eerder besproken voorbeelden geschiedde, de impulsduur gelijk maakt aan $10\tau_0$. Uit de formule die het tijdsverloop van een flits beschrijft [11]), volgt dat het aantal foto-elektronen dat na het tijdstip $t = 10\ \tau_0$ nog optreedt, gelijk is aan $N_0\ e^{-10}$. Indien de in de scintillator geabsorbeerde γ-energie b.v. 3 MeV is, is dit aantal ongeveer gelijk aan één (N_0 is immers E_1/E_i, d.w.z. in dit geval ca. 10^4; $e^{-10} \approx 10^{-4}$). Indien de dode tijd van het telwerk eveneens ca. $10\ \tau_0$ is — d.w.z. in geval van een teller met een NaI(Tl)-scintillator ca. 2,5 μs — kunnen 10 000 scintillaties per seconde geteld worden zonder grote correctie voor de dode tijd. Men heeft dan dus in ons voorbeeld eveneens 10 000 „staart-impulsen", d.w.z. de „ruis"-intensiteit wordt ca. $2\times$ zo groot. Dit is met een kleine verhoging van de discriminatorstand reeds te corrigeren (zie aanhangsel, verg. 11).

Uit het voorgaande blijkt dat de dode tijd van een scintillatieteller in hoofdzaak wordt bepaald door de aard van het scintillatiemateriaal. Hoe het gekozen compromis ook uitvalt, de impulsduur zal nooit kleiner kunnen worden dan τ_0; integendeel, men komt in de regel uit op 7 tot 10 τ_0. Dit betekent dat men het scheidend vermogen van scintillatietellers die met verschillende scintillatiematerialen zijn uitgerust, globaal kan vergelijken en bepalen door de τ_0-waarde van die materialen te beschouwen.

Het feit dat de dode tijd van een scintillatieteller nagenoeg geheel bepaald wordt door τ_0, is dus een gevolg van het feit dat een impuls een groep van mono-elektronimpulsen is. Indien de impuls een continu verschijnsel was, zodat men geen last zou hebben van de bovengenoemde staartimpulsen, dan zou men τ_1' wat kunnen verkleinen voordat de signaal-ruisverhouding even hoog zou zijn als die waarmee we thans te maken hebben. Wèl zou men dan meer moeten versterken (vgl. fig. 1).

Aanhangsel: De vorm van het ruisspectrum

Daar er theoretisch slechts weinig bekend is omtrent de statistiek van de secundaire emissie, d.w.z. omtrent de aard van de fluctuaties van g', kan de vorm van het ruisspectrum, en daarmee die van de functie $D(I_{th})$, niet berekend worden. Wel is het mogelijk dit verband af te leiden uit experimenten. Hierbij meet men voor diverse waarden van I_{th} hoe het aantal per seconde doorgelaten ruisimpulsen afhangt van de discriminatorstand V_d. In *fig. 5* vindt men de resultaten van een dergelijke meting. De snijpunten van de curven met de horizontaal met ordinaat 1 geven een aantal combinaties D, I_{th} waaruit men het gezochte verband kan afleiden. Men vindt:

$$D(I_{th}) \approx 0{,}9 + 1{,}25 \log I_{th} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

Bij $I_{th} = 10^4$ impulsen per seconde is D dus ongeveer gelijk 6.

Wanneer polyelektronimpulsen in enigszins belangrijke mate aanwezig zijn, vindt men een waarde voor D die aanzienlijk groter is (zie de streeplijn in fig. 5). Het aantal van dergelijke impulsen behoeft daartoe niet eens bijzonder groot te zijn. Een meting van de donkerstroom zegt derhalve nog niet veel over de discriminatorstand die nodig zal zijn om het aantal getelde ruisimpulsen tot een zeker bedrag te beperken.

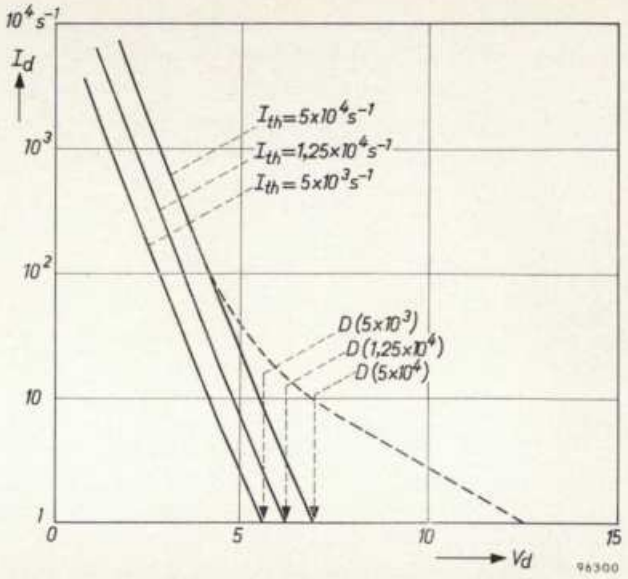


Fig. 5. Het verband tussen de discriminatorstand waarbij één ruisimpuls per seconde wordt doorgelaten, en het aantal per seconde geëmitteerde (thermische) ruiselektronen I_{th}, d.w.z. de functie $D(I_{th})$, kan empirisch bepaald worden uit de punten waar de horizontaal met ordinaatwaarde 1 de krommen snijdt die, voor diverse waarden van I_{th}, het verband geven tussen het aantal per seconde doorgelaten ruisimpulsen I_d en de discriminatorstand V_d (de getallen langs de V_d-as drukken de waarde van V_d uit als veelvoud van de gemiddelde ruisimpulshoogte).

Samenvatting. De verhouding van de hoogte van scintillatie-impulsen die corresponderen met een zekere geabsorbeerde energie, en de discriminatorstand waarbij niet meer dan b.v. 1 ruisimpuls per seconde wordt geteld, de zg. signaal-ruisverhouding, hangt o.a. af van de tijdconstante van het scintillatie-effect (τ_0), die van de anodeketen van de multiplicatorbuis (τ_1) en van de frequentiekarakteristiek van de versterker. Indien men laatstgenoemde (benaderd) beschrijft door slechts één tijdconstante (τ_2), is het probleem, welke combinatie de beste signaal-ruisverhouding oplevert, oplosbaar (althans numeriek).

Anderzijds bepalen de tijdconstanten ook de impulsduur, en daarmee de dode tijd van de scintillatieteller. Ten einde in de „staart" van de scintillatie-impuls, die een groep van mono-elektronimpulsen is, niet te veel van deze mono-elektronimpulsen afzonderlijk te tellen en daarmee het schijnbare ruisniveau te verhogen, kan men de impulsduur niet korter kiezen dan 7 à 10 τ_0. Heeft men een keus gedaan ten aanzien van het scintillatiemateriaal (waarmede τ_0 vastligt) en de impulsduur, dan kan men de signaal-ruisverhouding de kleinste waarde geven die onder deze omstandigheden bereikbaar is, door uit de τ_1,τ_2-combinaties die de gewenste impulsduur opleveren, die te kiezen waarvoor $\tau_1 = \tau_2$.

[11]) Zie formule (3) van I.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

MODERNE GELUIDSTECHNIEK

I. ALGEMENE GRONDSLAGEN

door D. KLEIS.

534.86:535.84:621.395.623.8

*Met elektrische weergave van muziek en het gesproken woord kan men sinds enige jaren een zodanig peil bereiken dat zelfs geoefende en zeer kritische luisteraars de weergave ternauwernood van het origineel kunnen onderscheiden. Aan deze voorwaarde moest voldaan zijn, wilde de elektro-akoestiek acceptabele middelen aan de hand kunnen doen ter verbetering van de akoestiek in zalen waar deze te wensen overlaat. Het kon dan ook drie jaar geleden in dit tijdschrift worden aangemerkt als „een belangrijke mijlpaal in de ontwikkeling van de electro-acustica dat vooraanstaande musici luidsprekers en wat daarbij behoort, niet slechts in de concertzaal toelaten, maar zelfs gaarne te hulp roepen om hun prestaties het reliëf te geven dat de zaal hun zonder dit hulpmiddel zou onthouden" *). Sinds dit geschreven werd, hebben „luidsprekers en wat daarbij behoort" hun intrede gedaan in talrijke zalen, waaronder er zijn van wereldvermaardheid, zoals het Teatro alla Scala te Milaan en het Théâtre National Populaire in het Palais de Chaillot te Parijs. Het is sindsdien al voorgekomen dat voor het optreden in een akoestisch minder gunstige zaal als eis werd gesteld dat er een soortgelijke installatie in werking zou zijn.*

In het hier volgende deel I van zijn artikel behandelt de schrijver de grondslagen van geluidsinstallaties zowel voor versterking van het geluid als voor het verbeteren en beheersen van de zaalakoestiek. In deel II zullen enige uitgevoerde installaties nader worden beschreven.

Inleiding

De elektro-akoestiek heeft de laatste jaren belangrijke vorderingen gemaakt. Microfoons, versterkers en luidsprekers zijn aanmerkelijk verbeterd, met de magnetische registratie, de langspeelgrammofoonplaten en de frequentiemodulatie zijn nieuwe en betere middelen ter beschikking gekomen voor registratie en overbrenging van het geluid. Het is daardoor mogelijk geworden, zowel de menselijke stem als muziek weer te geven met het natuurlijke spectrum, met nagenoeg de originele dynamiek en zonder storend geruis. Dit eist niet alleen goede, maar ook bij het doel aangepaste apparatuur, en een juiste en deskundige bediening. Maar al te vaak wordt aan de weergave in de praktijk afbreuk gedaan doordat deze voorwaarden niet voldoende zijn vervuld.

Voor de totale indruk van de geluidsweergave zijn het spectrum en de dynamiek, hoe belangrijk ook, niet de enige bepalende factoren. Bij het weergeven van een aantal stemmen of muziekinstrumenten speelt ook de ruimtelijke configuratie een grote rol. Stereofonische weergave, waarbij twee of meer afzonderlijke geluidskanalen worden gebruikt, maakt het mogelijk dat de beweging van acteurs over een toneel, de ruimtelijke uitgebreidheid van een orkest, enz. volledig tot hun recht komen [1]). De indruk is daardoor veel natuurlijker dan ooit met één geluidskanaal bereikt kan worden, hoe goed de geluidskwaliteit daarvan ook moge zijn. Het is gebleken dat zelfs zeer kritische luisteraars het verschil tussen de muziek van een echt ensemble en de stereofonische weergave ervan in dezelfde zaal nauwelijks, en vaak in het geheel niet, kunnen onderscheiden [2]).

Dit succes van de moderne geluidsweergave maakt het niet alleen mogelijk om het geluid van een toneel- of opera-uitvoering geheel onopvallend te versterken (b.v. in een grote zaal of in de open lucht), maar zelfs om het geluid van acteurs of musici volledig door een stereofonische installatie te laten weergeven, zonder dat het publiek dit beseft. De weg is nu geopend om de uitvoering te bevrijden van de beperkingen die de afmetingen en de inrichting van het toneel haar opleggen. Daardoor wordt de handeling veel natuurlijker en wordt het publiek er meer in betrokken. Dit is het best met enige voorbeelden te illustreren.

Bij toneel- en opera-uitvoeringen moet dikwijls een muzikale handeling op het toneel worden verricht door een niet-musicus. De acteur speelt dan pantomime, terwijl het geluid wordt verzorgd door een musicus in de orkestbak of tussen de coulissen. Deze truc is voor het publiek meestal zeer goed merkbaar, doordat het geluid uit een verkeerde

*) Philips techn. T. **17**, 230, 1955.

[1]) Zie Philips techn. T. **17**, 193 e.v., 1955, en de daarin aangehaalde literatuur.

[2]) R. Vermeulen, Vergelijking tussen weergegeven en echte muziek, Philips techn. T. **17**, 191-197, 1955.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

richting komt of doordat het geluid een andere klankkleur heeft dan men verwacht had. Wordt echter de muziek gespeeld voor onzichtbare microfoons en laat men het stereofonische geluidsbeeld met de acteur mee bewegen, dan kan de illusie nagenoeg volmaakt zijn. Een variant op deze methode is, dat men het geluid tevoren stereofonisch opneemt en het tijdens de voorstelling weergeeft, terwijl de acteur het geluidsbeeld volgt.

Bij opera's moeten voor het verkrijgen van een bepaald effect soms musici tussen de coulissen spelen of moet een koor achter de coulissen zingen. Nog afgezien van het feit dat deze plaats akoestisch meestal zeer ongunstig is, biedt een klein toneel niet eens de mogelijkheid ertoe, en zelfs op een groot toneel belemmeren de zangers en de musici het opkomen en afgaan van de andere artiesten. Veel beter kan men de koorzang of de instrumentale muziek tevoren stereofonisch opnemen en tijdens de uitvoering de geluidsband weergeven. Elektro-akoestische middelen verschaffen dan bovendien de gelegenheid, de illusie van een veel groter koor te scheppen. Voor muziekinstrumenten of effectgeluiden kan men de luidsprekers tussen de coulissen opstellen. Geluidseffecten (b.v. voetstappen, kanongebulder, onweer, regen) kunnen veel indrukwekkender zijn als men ze eenmaal met alle zorg opneemt en de geluidsband weergeeft, dan wanneer ze bij elke uitvoering opnieuw moeten worden opgewekt met akoestisch ongunstig opgestelde apparatuur, die slechts beperkte mogelijkheden biedt.

Voor geluidseffecten is nog een groot voordeel van elektro-akoestische opwekking dat ze niet tot de toneelruimte beperkt behoeven te blijven. Marktrumoer kan men b.v. rondom de toeschouwers weergeven, klaroenstoten of kanongebulder achter uit de zaal laten komen, onweer en regen van boven. Deze geluiden kan men ook stereofonisch door de zaal laten bewegen. Met dit van rondom komende („panoramische") geluid en het bewegende geluid („travelling sound") zijn bijzonder indrukwekkende effecten te verkrijgen. De toeschouwers voelen zich in de handeling opgenomen, zij doen er als het ware zelf aan mee.

Deze voorbeelden mogen voldoende hebben toegelicht hoeveel een uitvoering in mogelijkheden en uitdrukkingsvormen kan winnen bij ondersteuning door een goede elektro-akoestische installatie.

Tot nu toe hebben wij alleen gesproken over wat er op het toneel of orkestpodium gebeurt en over de elektro-akoestische ondersteuning die daaraan kan worden gegeven. De indruk die de uitvoering maakt, wordt echter niet alleen bepaald door het programma en de wijze van uitvoering, maar voor een belangrijk deel ook door de akoestiek van de zaal. Een voordracht en een toneelstuk verliezen veel van hun waarde als zij in een galmende zaal slecht verstaanbaar zijn, en een orkestuitvoering mist in een te sterk gedempte zaal het briljante dat ze in een goede concertzaal heeft. De kwaliteit van de moderne geluidsweergave nu heeft het mogelijk gemaakt om elektro-akoestische middelen toe te passen ter verbetering van de akoestiek van zalen. Daaraan bestaat grote behoefte. Er zijn nog altijd vrij veel zalen waarvan de akoestiek niet aan het doel beantwoordt. Verbouwing kan soms uitkomst brengen, maar komt niet steeds in aanmerking wegens de architectonische of historische waarde die aan het gebouw wordt gehecht; ze zal in de regel ook aanmerkelijk kostbaarder zijn, en meer tijd vergen, dan het aanleggen van een elektro-akoestische installatie waarmee de gewenste verbetering eveneens kan worden bereikt. Esthetische bezwaren tegen de aanwezigheid van microfoons en luidsprekers in de zaal behoeven niet te bestaan, aangezien deze onderdelen onopvallend — vaak zelfs geheel onzichtbaar — kunnen worden aangebracht.

Nog vaker komt het voor dat een bepaalde zaal dienst moet doen voor uitvoeringen van zeer verschillend karakter (toneel, opera, concerten, enz.), die ieder hun eigen eisen aan de akoestiek stellen. Men denke hierbij aan kleinere steden, waar het financieel niet mogelijk is zowel een schouwburg als een concertzaal te exploiteren. Doch niet alleen daar komt het voor dat aan een zaal tegenstrijdige eisen worden gesteld. Ook in grote steden namelijk, zoals in deel II van dit artikel zal blijken, moeten operagebouwen tevens dienst doen voor symfonieconcerten, schouwburgzalen voor orgelconcerten, enz. Zulke zalen vragen dus een regelbare akoestiek. Met niet-elektrische middelen — b.v. draaibare wandpanelen, die aan de ene zijde akoestisch hard en aan de andere zijde geluidabsorberend zijn — is het doel alleen op kostbare en dan nog gebrekkige wijze te bereiken. Langs elektro-akoestische weg daarentegen kan men de akoestiek veel eenvoudiger, sneller en doeltreffender regelen. Men is daardoor in staat, voor uitvoeringen van sterk uiteenlopend karakter steeds de gunstigste akoestische omstandigheden te scheppen.

De zoëven genoemde regelbare akoestiek biedt bijzondere voordelen voor toneel en opera. Ze geeft namelijk de mogelijkheid om de akoestiek van ogenblik tot ogenblik te doen passen bij de gespeelde scène. Tijdens een kerkscène b.v. kan men de zaal de akoestiek van een grote kerk geven. De toeschouwers zien dan niet alleen de kerkscène, maar

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

krijgen bovendien de suggestie dat zij zelf in de kerk zitten die op het toneel wordt uitgebeeld.

Een artistiek verantwoorde toepassing van deze werkwijze leidt tot een volkomen versmelting van de illusies die door het spel, de decors, de belichtingstechniek en het geluid worden opgewekt. Dientengevolge leeft het publiek in ongekende mate met de handeling op het toneel mee, en wordt deze handeling volledig vrijgemaakt van de beperkingen die een gegeven toneelruimte en een gegeven zaal eraan stellen. Hiervoor is deskundig bedieningspersoneel nodig, dat de apparatuur als een orgel kan bespelen om de effecten op te wekken die de artistieke leider wil bereiken. Gedurende de uitvoering moet dit personeel zich evenwel nauwgezet houden aan het draaiboek zoals dit tijdens de repetities onder artistieke leiding tot stand is gekomen.

In zalen met slechte akoestiek voor muziek hebben musici ermee te kampen dat ze hun eigen spel onvoldoende kunnen beoordelen en het spel van orkestleden met wie ze moeten samenspelen, onvoldoende kunnen horen. In beide opzichten is met elektro-akoestische middelen een grote verbetering te bereiken. Het resultaat is een „gemakkelijker bespeelbare" zaal en een beter samenspel, dus in het algemeen een fraaiere muzikale prestatie. Dit is niet minder belangrijk dan de verbetering van de zaalakoestiek zelf.

Inrichtingen voor verbetering van de akoestiek die niet behoeven te dienen voor geluidseffecten, zijn in wezen utiliteitsinstallaties. Hoewel deze soms zeer omvangrijk en technisch ingewikkeld zijn, moet hun bediening zo eenvoudig zijn dat deze kan worden toevertrouwd aan het normale technische personeel van het gebouw. De bediening moet zich beperken tot het inschakelen, het afwerken van een vast controleprogramma en het zetten van een kiesschakelaar in de stand die overeenkomt met de aard van de uitvoering (toneel, opera, kamermuziek, symfonische muziek, orgelmuziek). De taak om de technische middelen volledig te doen passen bij de aard van de zaal en bij de behoeften van het theater — een taak die veel deskundigheid vereist —, berust bij de installateur.

De Philipsschouwburg te Eindhoven en het Gebouw voor Kunsten en Wetenschappen in Den Haag zijn de eerste theaters die van een installatie ter verbetering van de akoestiek voor concerten werden voorzien [3]). Daarna heeft Philips elektro-akoestische theaterinstallaties van veel grotere omvang tot stand gebracht. Deze dienen voor het beheersen van de akoestiek, zowel voor muziek als voor spraak, en voor het verwezenlijken van geluidseffecten. Aldus uitgerust zijn o.a. het Teatro alla Scala in Milaan, het Palais de Chaillot in Parijs en het Grote Auditorium van de Expo '58 in Brussel. Tot deze installaties behoren bovendien nog allerlei voorzieningen ten dienste van het publiek buiten de zaal, van de artiesten, en van de technische staf van de genoemde theaters. In deel II van dit artikel zullen deze installaties uitvoerig worden besproken.

In het gedeelte dat aanstonds volgt, zullen wij de akoestische en technische grondslagen van geluidsinstallaties behandelen. Deze grondslagen gelden niet alleen voor installaties ter algehele beheersing van de zaalakoestiek in theaters, maar evenzeer voor de veel talrijker installaties met een veel beperkter doel, zoals het verstaanbaar maken van spraak in kerken en gehoorzalen, het weergeven van spraak en muziek in stadions en bij andere grote openluchtbijeenkomsten, enz. Als voorbeeld van een omvangrijke verstaanbaarheidsinstallatie in een grote fabriekshal zal in deel II de demonteerbare installatie van de „Volkswagen" fabriek te Wolfsburg worden besproken.

Eerst willen wij nog het volgende opmerken. Bij het gebruik van elektro-akoestische middelen ter ondersteuning van een uitvoering of ter beheersing van de akoestiek behoort als richtsnoer te gelden dat het elektro-akoestische karakter van het geluid nimmer mag opvallen. Onverschillig of het een eenvoudige installatie bij een voordracht dan wel een zeer grote theaterinstallatie betreft, de elektrotechniek op dit gebied bereikt haar hoogste doel indien de akoestische kwaliteiten ten volle worden toegeschreven aan de uitvoering zelf en aan de akoestiek van de zaal. Eén voorwaarde hiertoe is dat de gebruikte elektro-akoestische middelen van de hoogste kwaliteit zijn. Evenzeer echter is het noodzakelijk dat rekening is gehouden met de eigenschappen van het gehoor (de laatste schakel in de keten van geluidsopwekking tot geluidsgewaarwording) en met de wetten van de zaalakoestiek. Daarom zal nu aan de bespreking van de eigenlijke geluidstechniek een korte behandeling van enige belangrijke eigenschappen van het gehoor en van het geluid in zalen voorafgaan.

Enige eigenschappen van het gehoor

Toonhoogte en luidheid

Toonhoogte en luidheidsgewaarwording zijn door een logaritmisch verband gekoppeld aan de fysische grootheden frequentie en intensiteit van het geluid. Deze eigenschappen van het gehoor vormen

[3]) R. Vermeulen, Stereonagalm, Philips techn. T. 17, 223-231, 1955.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de basis voor het meten van die grootheden in octaaf en decibel [4]). De luidheidsgewaarwording wordt echter niet alleen bepaald door de geluidsintensiteit, doch in sterke mate ook door de frequentie van het geluid. Deze karakteristiek van het gehoor komt tot uiting in het isofonendiagram. Isofonen zijn krommen van gelijke luidheid in het diagram waarvan de geluidsintensiteit en de frequentie de coördinaten zijn (*fig. 1*). Vooral bij lage frequenties lopen de isofonen vrijwel horizontaal indien de geluidsintensiteit groot is, maar onder een aanmerkelijke helling als de intensiteit klein is. Als gevolg van dit verloop zal de klankkleur van weergegeven spraak en muziek afhankelijk zijn van de sterkte waarmee ze worden weergegeven. Voor deze klankverandering is het oor zeer gevoelig, en daarom is juiste sterkte-instelling een essentiële voorwaarde voor natuurlijke geluidsweergave [5]). Tegen deze regel wordt in de praktijk maar al te vaak gezondigd, en dan meestal doordat een te grote geluidssterkte is ingesteld. Het onvermijdelijke gevolg daarvan is een onnatuurlijke klankkleur door de extra grote luidheid van de lage tonen. Bovendien krijgt men niet een betere, maar een slechtere verstaanbaarheid, doordat de te luide lage tonen maskerend werken voor de hoge tonen, die voor de verstaanbaarheid van groot belang zijn. Dit geeft wel eens aanleiding tot klachten over geluidsinstallaties waaraan niets mankeert, doch die verkeerd bediend werden.

In gevallen waarin de luidheid groter moet zijn dan natuurlijk is, b.v. wegens lawaai van de omgeving, dient men de lage tonen passend te verzwakken, om de balans van lage en hoge tonen te herstellen. Omgekeerd moet men bij kleinere luidheid dan de natuurlijke — b.v. bij weergave van orkestmuziek in de huiskamer — de lage tonen extra versterken („fysiologische sterkteregeling").

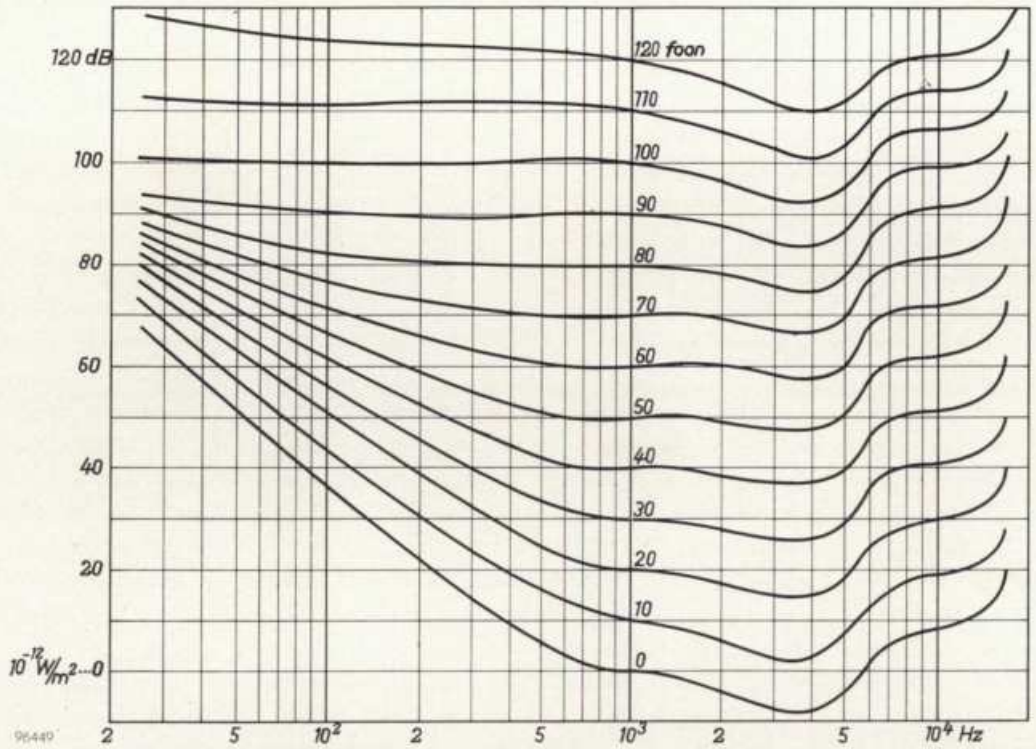


Fig. 1. Intensiteit van het geluid (in dB boven 10^{-12} W/m²) voor constant geluidsniveau (in foon), als functie van de frequentie van het geluid. De krommen heten isofonen; de isofoon voor 0 dB is de gehoorgrens. Bij lage frequenties lopen de isofonen vrijwel horizontaal als het geluidsniveau hoog is, en onder een grote helling als het niveau laag is. (Ontleend aan H. Fletcher en W. A. Munson, J. Acoust. Soc. Amer. **5**, 82, 1933.)

Richtinghoren

Een andere belangrijke eigenschap van het gehoor is het vermogen tot richtinghoren. Wij behandelen eerst het geval dat de geluidsbron en de waarnemer zich in de open lucht bevinden. Het geluid van een bron die, ter hoogte van het hoofd, buiten het symmetrievlak van het hoofd is opgesteld, wordt door de beide oren niet gelijkwaardig opgevangen. Het oor dat min of meer naar de bron toe gewend is, ontvangt het geluid eerder en sterker

[4]) R. Vermeulen, Octaaf en decibel, Philips techn. T. **2**, 47-56, 1937.

[5]) Bij de vergelijkende proeven waarover het in [2]) aangehaalde artikel gaat, werd er dan ook zorgvuldig op gelet dat de weergegeven muziek dezelfde sterkte had als de echte.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dan het andere oor, dat door het geluid alleen kan worden bereikt nadat dit om het hoofd heen gebogen is. Hoe verder zijdelings de geluidsbron staat, des te groter zullen het tijdsverschil en het intensiteitsverschil tussen beide oren zijn. Daar hoge tonen (korte golven) sterk door het hoofd worden afgeschermd, berust het richtinghoren van hoge tonen voornamelijk op de intensiteitsverschillen. Van lage tonen is de richting veel minder scherp te bepalen. Men maakt hiervan bij stereofonische weergave wel gebruik door de tonen beneden 300 Hz niet stereofonisch, maar via één kanaal weer te geven, zodat men voor de lage tonen met één luidspreker kan volstaan.

In een besloten ruimte kan de richting vrijwel niet worden bepaald indien het een voortdurende toon betreft. De oren bevinden zich dan namelijk op verschillende plaatsen in het patroon van staande golven en ondervinden daardoor grote verschillen, die met de richting van de geluidsbron niets uitstaande hebben. Wordt daarentegen de geluidsbron plotseling ingeschakeld, dan is de richting weer gemakkelijk te bepalen, daar het eerstaankomende geluid de richting reeds heeft vastgelegd, nog voordat het patroon van staande golven is opgebouwd. Van geluiden met veel inschakelverschijnselen (spraak, slaginstrumenten) is de richting dan ook het gemakkelijkst waar te nemen.

Het voorgaande had betrekking op richtingen in het horizontale vlak op oorhoogte. Veel moeilijker is de elevatie van een geluidsbron te bepalen. De waarneming van de elevatie geschiedt namelijk indirect, door kleine onbewuste bewegingen van het hoofd [6]). Visuele aanwijzingen kunnen de elevatiewaarneming sterk beïnvloeden. Toen het projectiescherm in de bioscopen groter en groter werd, heeft men wèl de behoefte gevoeld aan middelen om het geluid met de geluidsbron die in het geprojecteerde filmbeeld zichtbaar is, in horizontale richting mee te laten bewegen. In overeenstemming met de onduidelijke elevatiewaarneming is er nooit behoefte aan geweest, dit ook in verticale richting te doen.

Van één enkele geluidsbron kan door het richtinghoren dus de richting worden waargenomen, en van een aantal geluidsbronnen (sprekers, muziekinstrumenten) de ruimtelijke configuratie. Dit laatste geeft aan de muziek van een orkest een zekere doorzichtigheid, daar men in staat is, de instrumenten horenderwijs te onderscheiden. Dit is niet mogelijk wanneer men met één oor waarneemt, en evenmin bij luisteren naar een weergave via één kanaal.

Stereofonie

Zijn er, op enige afstand van elkaar, twee luidsprekers opgesteld die gelijktijdig en even sterk hetzelfde geluid geven, dan blijkt een luisteraar die even ver van beide luidsprekers is verwijderd, niet twee geluidsbronnen te horen, maar slechts één, en dit virtuele „geluidsbeeld" bevindt zich

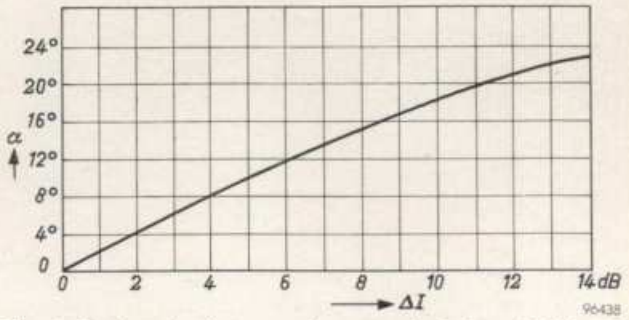


Fig. 2. Hoekverdraaiing α van het stereofonische geluidsbeeld uit het midden, als functie van het intensiteitsverschil ΔI van de twee luidsprekers.

midden tussen de twee luidsprekers in. Geeft één der luidsprekers het geluid eerder of sterker dan de andere, dan wordt het geluidsbeeld dichter bij de eerste luidspreker waargenomen. Een voorsprong in tijd van 3 ms of een sterkteoverwicht van 15 dB verplaatst het geluidsbeeld juist tot in de eerste luidspreker; kleinere tijds- en sterkteverschillen geven, onafhankelijk van elkaar en additief, evenredig kleinere verplaatsingen; zie *fig. 2* en *fig. 3* [7]).

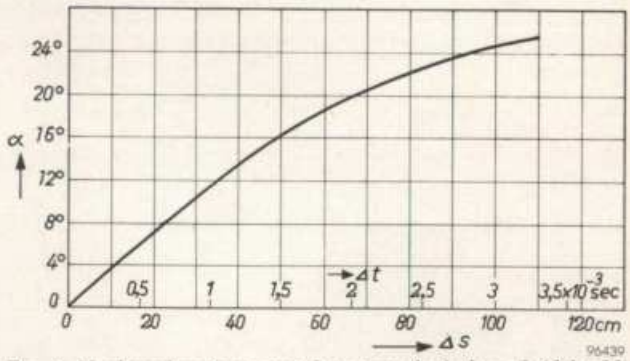


Fig. 3. Hoekverdraaiing α van het stereofonische geluidsbeeld uit het midden, als functie van het tijdsverschil Δt van de twee luidsprekers (wegverschil Δs van de twee geluidsbijdragen).

Verplaatsingen die het gevolg zijn van een tijdsverschil, kunnen te niet worden gedaan door het aanbrengen van een bepaald sterkteverschil; *fig. 4* laat zien dat daarbij 5 dB sterkteverschil correspondeert met 1 milliseconde tijdsverschil.

De eigenschap van het gehoor, twee geluiden te laten versmelten tot één geluidsbeeld, waarvan de

[6]) K. de Boer, Een merkwaardig verschijnsel bij stereofonische geluidsweergave, Philips techn. T. **9**, 8-13, 1947.

[7]) K. de Boer, Stereofonische geluidsweergave, Philips techn. T. **5**, 112-119, 1940.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

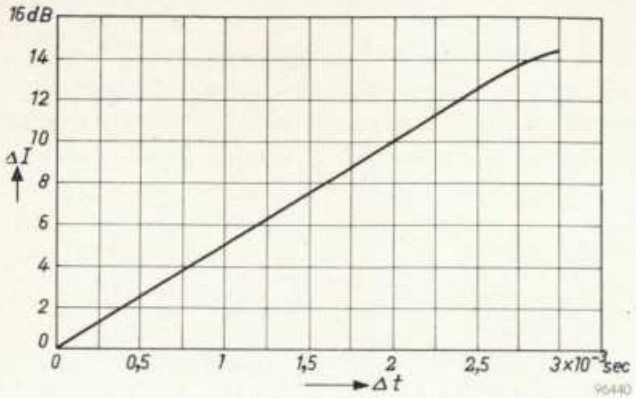


Fig. 4. Bij elk tijdsverschil Δt is uitgezet het intensiteitsverschil ΔI dat een even grote hoekverdraaiing van het stereofonische geluidsbeeld veroorzaakt.

plaats binnen de genoemde grenzen is bepaald door de tijds- en sterkteverschillen van de twee geluiden, vormt de basis van de stereofonische geluidsweergave. Bij passende opstelling van twee microfoons, die via afzonderlijke kanalen met de twee luidsprekers zijn verbonden (*fig. 5*), wordt een bepaalde openingshoek vóór de microfoons akoestisch tussen de luidsprekers afgebeeld. Op deze wijze kan men het geluidsbeeld van een spreker of een muziekinstrument ergens tussen de luidsprekers plaatsen. Bovendien kan men het verplaatsen, door op een regeltafel tijds- en/of sterkteverschillen tussen de signalen van beide kanalen tot stand te brengen. Deze techniek is zeer gebruikelijk in filmstudio's bij het maken van films met meer dan één geluidsspoor, en staat daar bekend als „pan-potting" (= „panoramic potentiometering").

Bevindt de luisteraar zich niet even ver van de twee luidsprekers, dan ontstaat er door het verschil in afstand een extra-tijdsverschil. Het stereofonische geluidsbeeld verplaatst zich dientengevolge naar de luidspreker die zich het dichtst bij de luisteraar bevindt. In een groot deel van de zaal is deze verplaatsing binnen redelijke grenzen te houden door passende opstelling van de luidsprekers en juiste keuze van hun bundeling (op dit laatste komen wij nog terug); men kan op deze wijze namelijk sterkteverschillen teweegbrengen die zodanig van de plaats van waarneming afhangen dat de invloed van de afstandsverschillen er grotendeels door gecompenseerd wordt.

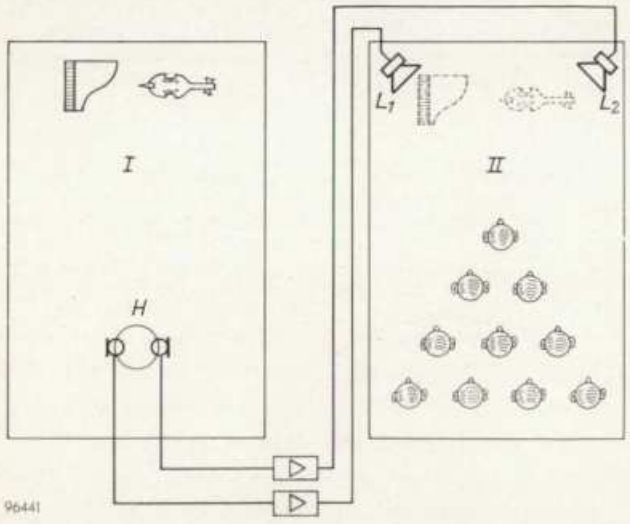


Fig. 5. Stereofonische overbrenging van muziek. De microfoons van een kunsthoofd H in zaal I zijn via gescheiden kanalen verbonden met luidsprekers L_1 en L_2 in zaal II. Hier krijgt het publiek stereofonisch een indruk van de ruimtelijke configuratie der muziekinstrumenten.

Ontvangt de luisteraar geluid van twee luidsprekers met meer dan 3 ms tijdsverschil, dan hoort hij al het geluid uit die luidspreker komen waarvan hij het geluid het eerst ontvangt; zelfs door het geluid van de andere luidspreker sterker te maken, kan men het geluidsbeeld niet meer verplaatsen. Van stereofonie is er dan dus geen sprake meer. Bij een tijdsverschil van ca. 20 ms kan de vertraagde luidspreker tot 10 dB sterker zijn voordat men zelfs maar de indruk krijgt dat deze luidspreker geluid geeft. De vertraagde luidspreker heeft echter nog wel invloed op de kwaliteit van het geluid. Dit wordt door het werken van deze luidspreker namelijk niet alleen luider, maar ook voller van klank.

Is het tijdsverschil groter dan 50 ms, dan neemt men het geluid dat het laatst aankomt, afzonderlijk waar als een storende echo, tenzij het 10 of meer dB zwakker is dan het voorafgaande geluid.

Van de eigenschap van het gehoor om geluid met een vertraging van ca. 3 tot ca. 50 ms te laten samensmelten met het eerstaankomende geluid, en het ook uit de richting van het eerstaankomende geluid te horen, kan voor elektrische geluidsversterking gebruik worden gemaakt om het geluid van b.v. een spreker max. 10 dB te versterken, zodanig dat de toehoorders zich van de elektro-akoestische hulpmiddelen niet bewust zijn. Het geluid komt dan namelijk schijnbaar nog steeds van de spreker, ook al staat de luidspreker in een andere richting.

Bovengenoemde eigenschappen van het oor maken het richtinghoren in een zaal mogelijk, niettegenstaande het overgrote deel van het geluid de luisteraars bereikt via reflexies tegen de wanden, dus uit andere richtingen dan die van de geluidsbron. De reflexies maken via de wand een omweg door de zaal en bereiken de luisteraars dus altijd met een zekere vertraging ten opzichte van het geluid dat direct van de geluidsbron komt. De vertraging die het gereflecteerde geluid in een grote zaal ondergaat, in het bijzonder nadat het een aantal

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

malen door de wanden heen-en-weergekaatst is, overschrijdt verre het bovengenoemde tijdsverschil van 50 ms, dat overeenkomt met een weg van ca. 17 m. Toch hoort men in een akoestisch goede zaal de reflexies niet afzonderlijk, doch gezamenlijk als een nagalm. Het gehoor onderscheidt afzonderlijke reflexies alleen indien deze boven het algemene geluidspeil uitsteken en tevens op zijn minst 50 ms vertraagd zijn. Maken ze echter deel uit van een reeks van elkaar binnen 50 ms opvolgende reflexies, dan worden ze niet gescheiden waargenomen.

Uit het voorafgaande volgt dat bij geluidsweergave via twee luidsprekers drie gevallen kunnen worden onderscheiden:

1) Volgen de geluiden elkaar op binnen 3 ms, dan smelten ze samen tot een stereofonisch geluidsbeeld, waarvan de plaats tussen de luidsprekers is bepaald door het tijds- en het intensiteitsverschil van de beide geluiden.
2) Volgen de geluiden elkaar op met een interval tussen ca. 3 en ca. 50 ms, dan bepaalt het eerstaankomende geluid de richting; het vertraagde geluid draagt wel tot de luidheid bij en heeft bovendien nog invloed op de geluidskwaliteit, doordat het een meer ruimtelijke indruk schept.
3) Volgen de geluiden elkaar op met een interval van meer dan 50 ms, dan vormt het laatstaankomende geluid in het algemeen een storende echo, tenzij het ten minste 10 dB zwakker is dan het voorafgaande geluid.

Het eerste en het tweede geval doen zich voor bij geluidsweergave en bij het luisteren naar muziek in een akoestisch goede zaal. Het derde geval treedt alleen in akoestisch slechte zalen op, b.v. bij „kletterecho's" tussen evenwijdige wanden en bij storende reflexies tegen de achterwand. In elektro-akoestische installaties dient deze toestand door passende opstelling van de luidsprekers onder alle omstandigheden te worden vermeden.

Zaalakoestiek

Voor een juiste toepassing van elektro-akoestische middelen moet men zich, behalve van de eigenschappen van het gehoor, ook rekenschap geven van het gedrag van het geluid in de open lucht en in een besloten ruimte, dus van de grondslagen van de zaalakoestiek.

We hebben er zojuist gewag van gemaakt dat de luisteraars in een zaal het geluid slechts voor een gering deel direct van de bron ontvangen („direct geluid") en voor het overgrote deel via reflexies aan de wanden („indirect geluid"). Spraak en muziek klinken dientengevolge in een zaal veel luider dan in de open lucht, waar men door het vrijwel ontbreken van reflexies alleen te maken heeft met het directe geluid.

Het directe geluid is karakteristiek voor de geluidsbron zelf. Het vertegenwoordigt de informatie en de artistieke prestatie van de uitvoering. Door het vermogen tot richtinghoren kan de luisteraar in het directe geluid de ruimtelijke uitgebreidheid van een orkest, de beweging van acteurs over een toneel, enz., horenderwijs waarnemen. Hieruit volgt dat voor goede geluidsweergave de luidsprekers het directe geluid met het natuurlijke spectrum, met de natuurlijke dynamiek en stereofonisch juist moeten weergeven.

Het indirecte geluid, hoewel natuurlijk eveneens van de geluidsbron afkomstig, is in de eerste plaats karakteristiek voor de akoestiek van de zaal. Het onderscheidt zich van het directe geluid op drieërlei wijze.

In de eerste plaats komt het indirecte geluid niet uit een bepaalde richting, maar uit alle richtingen rondom. In tegenstelling met het gerichte, directe geluid is het indirecte geluid dus diffuus, en wel des te meer naarmate de wanden het geluid beter naar alle richtingen verspreiden (dus diffuus, niet spiegelend, reflecteren) en minder absorberen. Om diffuus te kunnen reflecteren, moeten de wanden ruw zijn. De ruwheid moet men zien in verhouding tot de golflengten van het geluid. Deze lopen uiteen van enkele meters voor de lage tonen tot enige cm voor de hoge tonen. Uit het oogpunt van diffuusheid zijn de oude concertzalen met hun veelvuldige sculptuur gunstiger dan moderne zalen, waarvan de wanden in het algemeen veel strakker zijn. Bijzonder ongunstig is het, indien het geluid, als gevolg van de vorm der wanden, in bepaalde punten van de zaal gefocusseerd wordt. In dit geval kunnen hinderlijke echo's optreden.

Doordat het indirecte geluid diffuus is, zal het overal in de zaal ongeveer even sterk zijn. De intensiteit van het directe geluid daarentegen is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tot de geluidsbron. De verhouding van de sterkten van het directe en het indirecte geluid geeft de luisteraar een aanwijzing ten aanzien van zijn afstand tot de bron.

Een tweede verschil tussen de beide soorten geluid is, dat het indirecte geluid een omweg maakt via de wanden en dus altijd vertraagd ten opzichte van het directe geluid aankomt. Deze vertraging is vrij klein voor de reflexies tegen de achterwand van het toneel of podium en tegen de vloer; deze reflexies komen vrijwel uit dezelfde richting als het directe

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

geluid. De van elders komende reflexies zullen meer vertraagd zijn naarmate de zaal groter is. Zoals boven werd uiteengezet, is reeds een kleine vertraging van een reflexie voldoende om de invloed ervan op het richtinghoren in het directe geluid uit te schakelen. Door de vertraging is de gewaarwording voor het directe en het indirecte geluid echter verschillend en neemt de luisteraar in dit laatste een meerdere of mindere diffuusheid waar.

Een derde onderscheid tussen direct en indirect geluid is, dat het directe geluid, wanneer de geluidsbron ophoudt te werken, vrijwel tegelijk verdwijnt, terwijl het indirecte geluid nog blijft naklinken, gedurende een tijd die afhangt van de mate waarin het geluid bij iedere terugkaatsing aan een wand wordt geabsorbeerd. Behalve deze wandabsorptie ondervindt het geluid een naar hogere frequenties toenemende demping op zijn weg door de lucht, vooral als gevolg van verontreinigingen van de lucht (vocht, kooldioxyde, rook). Naarmate de absorptie kleiner is, zal het geluid sterker en meer diffuus zijn en zal het langer duren voordat het is uitgestorven.

Deze samenhangende eigenschappen karakteriseert men door de nagalmtijd, d.i. bij definitie de tijd waarin het geluid 60 dB (d.w.z. tot één miljoenste van zijn beginintensiteit) afneemt nadat de geluidsbron heeft opgehouden te werken; in de praktijk komt dit neer op de tijd die het geluid nodig heeft om tot onhoorbaar uit te sterven. De nagalmtijd blijkt evenredig te zijn met het volume van de zaal en omgekeerd evenredig met de totale equivalente dempende oppervlakte (wet van Sabine [8]). Deze oppervlakte wordt meestal aangeduid als „het aantal m² open raam"; een wandgedeelte met een oppervlakte van 2 m² en een absorptiecoëfficiënt van 0,1 draagt tot de equivalente dempende oppervlakte 0,2 m² „open raam" bij.

De nagalmtijd neemt in het algemeen met de grootte van de zaal toe, daar het volume sneller toeneemt dan de oppervlakte van de wanden. Uit metingen in een groot aantal zalen met goede akoestiek kan men zich een beeld vormen van de beste nagalmtijd voor zalen van verschillend volume en voor verschillende doeleinden (*fig. 6*).

Doordat de absorptiecoëfficiënten van de verschillende stoffen waarmee de wanden zijn bekleed, functies van de frequentie zijn, hangt de nagalmtijd af van de frequentie van het geluid. Door het verloop van deze functies verleent iedere zaal aan het indirecte geluid een bepaalde klankkleur. Er is, wat dit betreft, een groot verschil tussen b.v. een houten en een stenen gebouw. Een zaal met een glazen dak of met grote ramen heeft een korte nagalmtijd van de lage tonen, doordat het glas de lage tonen grotendeels naar buiten doorlaat. In *fig. 7* is voor enige concertzalen het verloop van de nagalmtijd als functie van de frequentie weergegeven. In het algemeen daalt de nagalmtijd naar hogere frequenties toe, doordat de gebruikelijke wandmaterialen daar meer gaan absorberen en bovendien de luchtdemping daar snel toeneemt. Spreekt men over „de" nagalmtijd, dan bedoelt men meestal die voor ca. 500 Hz.

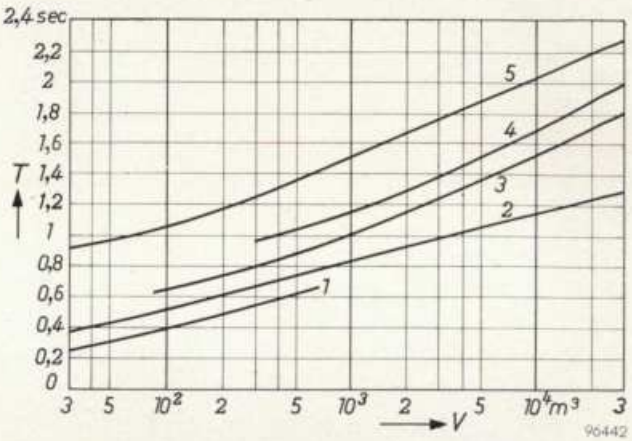


Fig. 6. De gunstigste nagalmtijd T voor verschillende soorten zalen, in afhankelijkheid van het volume V van de zaal (ontleend aan L. L. Beranek, Acoustics, McGraw-Hill, New York 1954). Kromme *1*: omroepstudio's voor spraak. Kromme *2*: vergaderzalen, bioscopen. Kromme *3*: omroepstudio's voor muziek, operazalen. Kromme *4*: concertzalen, protestantse kerken, synagogen. Kromme *5*: katholieke kerken, zalen voor orgelmuziek.

Het publiek vertegenwoordigt in een zaal een belangrijke geluidsabsorptie. Om te voorkomen dat de akoestiek sterk afhankelijk zou zijn van de mate van bezetting, streeft men ernaar, de stoelen zo te bekleden dat ze bezet of onbezet ongeveer dezelfde absorptie geven.

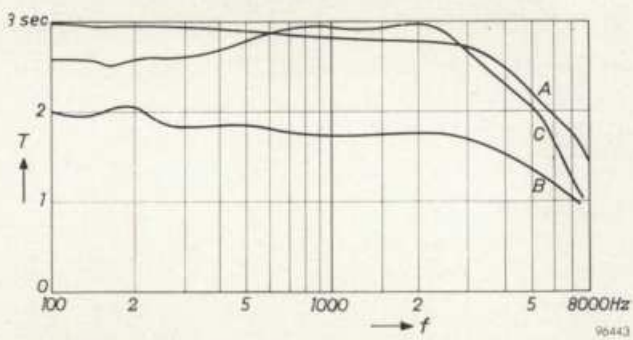


Fig. 7. Nagalmtijd T als functie van de frequentie f voor enige concertzalen, naar metingen van W. Tak. Kromme *A*: Grote zaal van het Concertgebouw te Amsterdam. Kromme *B*: Philharmonic Hall te Liverpool. Kromme *C*: St. Andrew's Grand Hall te Glasgow.

[8]) Zie b.v. A. Th. van Urk, Zaalakoestiek en nagalm, Philips techn. T. **3**, 65-73, 1938.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Zaalakoestiek voor spraak resp. muziek

Naar gelang een zaal dient voor spraak of voor muziek, moet de akoestiek verschillend zijn.

Voor spraak wenst men wèl de vergroting van de luidheid door het indirecte geluid, maar niet de nagalm, daar deze de verstaanbaarheid vermindert. Zoals eerder werd gezegd, draagt indirect geluid dat binnen ca. 50 ms na het directe geluid aankomt, nuttig tot de luidheid bij en benadeelt het noch de richtingsindruk noch de verstaanbaarheid. Geluid met meer dan 50 ms vertraging echter vermindert de verstaanbaarheid, doordat het de opeenvolgende spraakklanken door elkaar doet lopen. Om niet meer te storen, moet het geluid na 50 ms ongeveer 10 dB zwakker zijn geworden. Toneelzalen en voordrachtszalen worden dan ook zo gebouwd dat reflexies die minder dan 50 ms vertraagd zijn, zo veel mogelijk op het publiek worden gericht, en dat reflexies met grotere vertraging zo sterk mogelijk worden gedempt door op de juiste plaatsen op de wanden absorberend materiaal aan te brengen. Zo zal men b.v. het onderste deel van de achterwand van een toneelzaal akoestisch hard maken en naar voren laten hellen, om het publiek achter in de zaal nuttig geluid extra te geven. Het bovendeel van de achterwand echter zal men met absorberend materiaal bekleden, om te voorkomen dat reflexies met grote vertraging vóór in de zaal en op het toneel zouden storen. Door het richten van de reflexies op het publiek heeft een goede toneelzaal een vrij korte nagalmtijd (0,7 tot 1,0 s) en weinig diffuusheid.

Voor muziek dragen de diffuusheid en de nagalm essentieel bij tot de mooie klank. Een symfonieorkest vraagt een grote zaal en een nagalmtijd van 1,8 tot 2,5 s om volledig tot zijn recht te komen. Een kerkorgel heeft een nog grotere ruimte en een nog langere nagalmtijd nodig.

We kunnen de hierboven gebleken aspecten van het geluid in een zaal, die de basis vormen voor elektro-akoestische beheersing van de akoestiek, als volgt samenvatten:

1) Er is een principieel verschil tussen het directe en het indirecte geluid. Het directe geluid geeft de stereofonische indruk van hetgeen er op het toneel of orkestpodium plaatsvindt; het geeft de „definitie" aan het geluid. Het indirecte geluid verschaft met zijn klankkleur, diffuusheid en nagalm een indruk van de zaal; het geeft ruimtelijkheid aan het geluid en rijkdom aan de klank van de muziek, en wel des te beter naarmate het meer diffuus is. Voor zover het indirecte geluid meer dan 50 ms vertraagd is, benadeelt het echter de verstaanbaarheid van spraak.
2) De vertraging van het indirecte geluid verschaft de indruk van de grootte der zaal.
3) De verhouding van de sterkten van direct en indirect geluid bepaalt de afstandsindruk.

Elektro-akoestische beheersing van de zaalakoestiek

In het natuurlijke geluid in een zaal zijn het directe en het indirecte geluid onderling verbonden door de eigenschappen van de zaal. De mogelijkheid om de akoestiek van een zaal te beheersen, wordt geschapen doordat men langs elektro-akoestische weg in staat is, het directe en het indirecte geluid afzonderlijk van elkaar op te wekken en te regelen. In de moderne geluidsinstallaties vindt men dan ook als principe het gescheiden opwekken van direct en indirect geluid door afzonderlijke luidsprekergroepen.

Direct geluid

Om vrijwel zuiver direct geluid op te wekken, gebruikt men luidsprekers die hun geluid in de richting van de toehoorders bundelen, zodat er zo weinig mogelijk op de wanden valt. De winst in de verhouding van direct tot indirect geluid die men door een goede bundeling kan behalen, wordt gedemonstreerd door het volgende getallenvoorbeeld.

Men denke zich een grote zaal met akoestisch harde wanden en een naar achteren oplopende vloer, en in deze zaal een spreker, die de toehoorders ziet binnen een horizontale openingshoek van 90° en een verticale openingshoek van 15°.

Voor de tonen van het lage en het middelste frequentiegebied kan men de spreker vrijwel beschouwen als een bolstraler, die zijn geluid gelijkmatig naar alle richtingen uitstraalt. Een eenvoudige berekening leert dat de ruimtehoek waarbinnen hij de toehoorders ziet, slechts ca. $^1/_{30}$ beslaat van de totale ruimtehoek van 4π steradialen om de spreker heen. Slechts $^1/_{30}$ van het geluidsvermogen komt dus als direct geluid aan het publiek ten goede en $^{29}/_{30}$ valt op de wanden, die het grotendeels als storend, nagalmend, geluid terugkaatsen. De verhouding van direct tot indirect geluidsvermogen is dus ca. $^1/_{30} : 1$. Daardoor zal men de spreker alleen op de voorste rijen goed kunnen verstaan; naar achteren toe neemt de verstaanbaarheid snel af (*fig. 8a*).

Denkt men zich in plaats van de spreker een luidspreker die ideaal bundelt, d.w.z. die het publiek juist in zijn scherp omgrensde openingshoek omvat, dan zal het gehele geluidsvermogen het publiek volledig als direct geluid bereiken. De kleding van het publiek en onbezette, goed beklede, stoelen absorberen ca. 80% van het erop vallende geluid (behalve voor zeer lage tonen; hierover straks). De

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

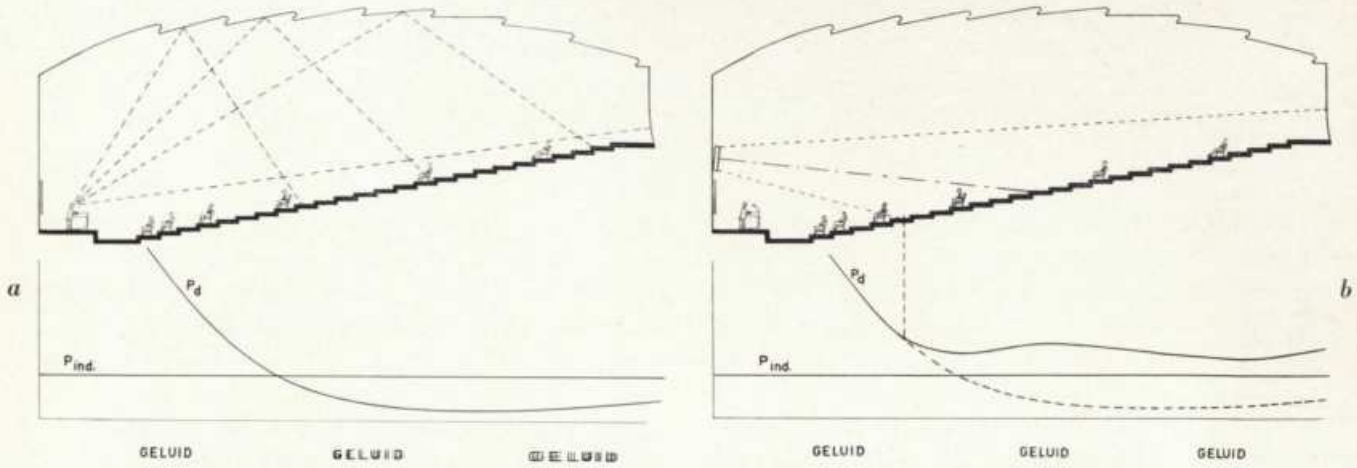


Fig. 8. *a*) Een spreker in een grote zaal met akoestisch harde wanden (lange nagalmtijd) is op de voorste rijen nog verstaanbaar, maar verder naar achteren bederft het te sterke indirecte geluid de verstaanbaarheid (vgl. de krommen die, als functie van de afstand tot de spreker, de geluidsdrukken P_d van het directe en P_{ind} van het indirecte geluid weergeven). *b*) Met behulp van een groep luidsprekers die het geluid gebundeld op de achterste helft van de zaal richt, kan men P_d overal in de zaal zo groot in verhouding tot P_{ind} maken dat de spreker op alle rijen goed verstaan wordt.

teruggekaatste fractie, ca. 20%, valt op de wanden en is aansprakelijk voor een zekere intensiteit van indirect, nagalmend geluid. De verhouding van direct tot indirect geluidsvermogen is nu ca. 5 : 1, dus ca. 150 maal zo groot als in het geval van de spreker. Het directe geluid kan nu tot zelfs op de achterste rijen het indirecte geluid overtreffen, zodat het gesprokene in de gehele zaal goed verstaanbaar zal kunnen zijn (fig. 8*b*).

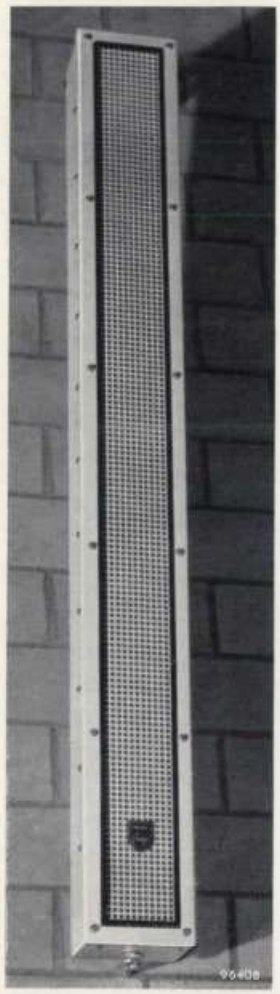


Fig. 9. Een luidsprekerzuil.

In werkelijkheid is meestal zowel de spreker als de bundelende luidspreker in de zaal aanwezig en dient deze laatste ter ondersteuning van de spreker, die normaal spreekt, alsof er geen geluidsinstallatie was. Het indirecte geluid dat de spreker zelf veroorzaakt, is dan uiteraard even sterk als het zonder geluidsinstallatie zou zijn. Volgens het voorgaande kan men het directe geluid van de spreker 150-voudig versterkt door de luidspreker weergeven vóór het indirecte geluid noemenswaard zal toenemen; het bovengenoemde voordeel van bundeling is dus vrijwel volledig te verwezenlijken. In de praktijk blijkt men met een veel kleinere versterking te kunnen volstaan, in het bijzonder als men de bundel — waarin de intensiteit vanaf het centrum naar de rand geleidelijk afneemt — met het midden op de achterste helft van de zaal richt (fig. 8*b*). De intensiteitsverhouding van direct tot indirect geluid kan dan op alle plaatsen vrijwel gelijk zijn en voldoende voor goede verstaanbaarheid, zonder dat de toehoorders zich bewust zijn dat zij de luidspreker horen. De indruk dat zij de spreker rechtstreeks horen, wordt nog versterkt indien men de luidspreker(s) zo opstelt dat zijn (hun) geluid 10 tot 20 ms later bij de toehoorders aankomt dan het directe geluid van de spreker. De richtingsindruk wordt onder deze omstandigheden evenmin verstoord als in een goede zaal door de „nuttige" reflexies met minder dan 50 ms vertraging.

Zoals bekend, verkrijgt men een bundel met een grote horizontale en een kleine verticale openingshoek door middel van een luidsprekerzuil of geluidszuil, d.i. een aantal boven elkaar geplaatste en in faze werkende luidsprekers (*fig. 9*).

De bundelende werking van een luidsprekerzuil berust op interferentie. Men denke zich de zuil verticaal, en een waarnemer in het horizontale middenvlak van de zuil, op een afstand die groot ten opzichte van de lengte der zuil is. De geluidsgolven van de verschillende luidsprekers in de zuil zullen bij de waarnemer in faze aankomen en elkaar dus versterken. Bevat de zuil n luidsprekers, dan zal bij de waarnemer de geluidsdruk n maal, en de geluidsintensiteit n^2 maal zo groot zijn als de overeenkomstige grootheden voor één enkele luidspreker uit de zuil. Daar aan deze luidspreker $1/n$ van het vermogen van de gehele zuil wordt toegevoerd, is voor de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

waarnemer het rendement van de zuil n maal zo groot als dat van een afzonderlijke luidspreker.

Beweegt de waarnemer zich omhoog of omlaag, dan komt hij op ongelijke afstanden van de luidsprekers. Hij ontvangt hun geluidsgolven niet meer alle in faze, waardoor deze onvolledig samenwerken en de geluidsintensiteit dus afneemt. Is de waarnemer zo ver boven of beneden het horizontale middenvlak dat zijn afstanden tot de bovenste en de onderste luidspreker juist de golflengte λ verschillen (wij nemen aan dat de luidsprekers slechts één toon voortbrengen), dan vindt iedere luidspreker boven het middenvlak een halve zuillengte lager een tegenspeler waarvan de geluidsgolven juist in tegenfaze bij de waarnemer aankomen. In de richtingen waarvoor dit het geval is, wordt dus geen geluid uitgestraald. Dezelfde toestand

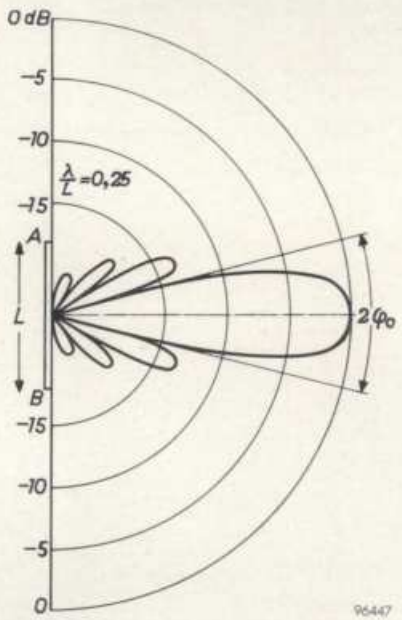


Fig. 10. Richtingsdiagram van een luidsprekerzuil AB in het verticale symmetrievlak, voor één frequentie van het geluid. Bijna alle energie wordt uitgestraald in de hoofdbundel, waarvan de openingshoek $2\varphi_0$ kleiner is naarmate de frequentie hoger en de zuil langer is.

treedt op als de waarnemer zo ver buiten het middenvlak gaat dat zijn afstanden tot de bovenste en de onderste luidspreker 2λ, 3λ, ... verschillen.

Tussen deze nulrichtingen in bevinden zich richtingen met maximale geluidsuitstraling (*fig. 10*), welke echter steeds kleiner is dan die in het middenvlak; alleen in dit vlak namelijk worden alle luidsprekers in faze ontvangen. Is de geluidsintensiteit in het middenvlak (het „nulde" maximum) I_0, dan is de intensiteit in het k-de maximum:

$$I_k = \left|\frac{1}{(k+\tfrac{1}{2})\pi}\right|^2 I_0 .$$

Men kan zeggen dat de geluidsstraling voor het overgrote deel is geconcentreerd binnen de eerste nulrichtingen. De aldus gedefinieerde openingshoek $2\varphi_0$ is bepaald door

$$\sin\varphi_0 = \frac{\lambda}{L},$$

waarin L de lengte van de zuil is. Bij kleine waarden van φ_0 mag voor de openingshoek worden geschreven:

$$2\varphi_0 = \frac{2\lambda}{L}.$$

De verticale bundeling van een luidsprekerzuil is scherper naarmate de zuil langer en naarmate de golflengte van het geluid kleiner is (dus de frequentie hoger is). Van een zuil van 2 m lengte is de openingshoek bij 300 Hz 68°, en bij 3000 Hz nog slechts 6,4°. Om zoveel mogelijk toehoorders binnen de nauwe hogetonenbundel te vatten, moet men de zuil zo opstellen dat de bundel dicht over de hoofden scheert.

De horizontale bundeling van de zuil is dezelfde als van een afzonderlijke luidspreker. Ook de enkele luidspreker heeft de neiging de hoge tonen in een steeds nauwere bundel om de as te concentreren. De horizontale bundeling is meestal ongewenst, daar ze een goede verdeling van de hoge tonen over de luisteraars verhindert, en juist de hoge tonen zijn voor een goede verstaanbaarheid onontbeerlijk. Om de horizontale bundeling te vermijden, verdient het in de eerste plaats aanbeveling, dubbelconusluidsprekers te gebruiken. Bij deze strekt het frequentiegebied zich uit tot ca. 18 kHz, dus tot de hoogste audiofrequenties, en de bundeling voor hoge frequenties is veel minder scherp dan bij enkelconusluidsprekers [9]). In de tweede plaats is het gunstig, de luidsprekers van de zuil niet met hun assen evenwijdig te plaatsen, maar deze zodanig ten opzichte van elkaar te verdraaien dat de afzonderlijke hogetonenbundels de totale bundel zo gelijkmatig mogelijk vullen. Voor de tonen van het lage en het middengebied vormen de luidsprekers dan een lange zuil met scherpe bundeling, voor de hogere tonen wordt het voor iedere toehoorder werkzame deel van de zuil meer en meer beperkt tot de luidsprekers die op zijn naaste omgeving zijn gericht, en voor de zeer hoge tonen is voor ieder punt van de zaal nog maar één luidspreker werkzaam. De met toenemende frequentie gepaard gaande verkorting van het werkzame deel van de zuil houdt dan ongeveer gelijke tred met de kleiner wordende golflengte, hetgeen resulteert in een vrijwel constante openingshoek.

Beneden ca. 300 Hz is de bundeling, zelfs van een zuil van ettelijke meters lengte, onvoldoende en neemt bovendien de geluidsabsorptie door het publiek af. Er zou bij deze frequenties dus toch weer indirect, nagalmend, geluid ontstaan. Om dit te voorkomen, moet men de weergave van de lage tonen verzwakken door middel van een elektrisch filter en/of door de resonantiefrequentie van de luidsprekers in de buurt van 300 Hz te leggen (beneden de resonantiefrequentie neemt bij dalende

[9]) J. J. Schurink, De elektrodynamische dubbelconusluidspreker, Philips techn. T. **16**, 289-298, 1954, in het bijzonder fig. 9 en fig. 10.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 11. Het toneel in het Palais de Chaillot te Parijs. Links en rechts een luidsprekerzuil (zie ook fig. 12) voor versterking van direct geluid. Boven het toneel: luidsprekers voor indirect (diffuus) geluid.

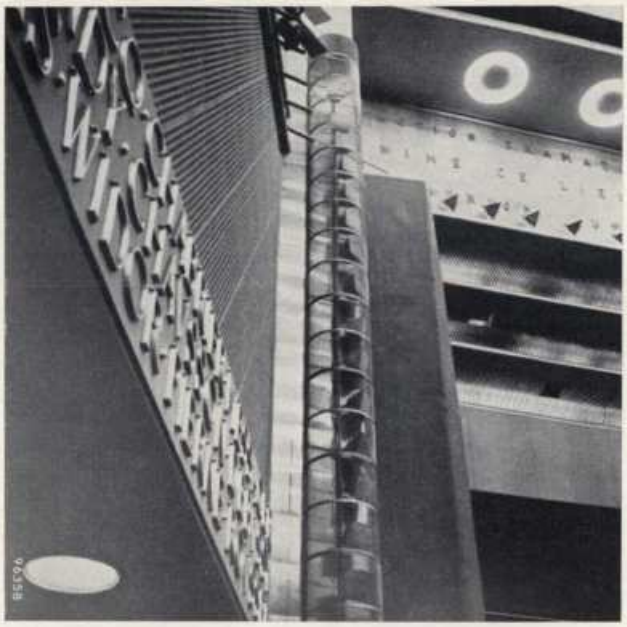


Fig. 12. Eén van de in fig. 11 afgebeelde luidsprekerzuilen. De luidsprekers waaruit de zuil is samengesteld, zijn verschillend gericht, om de hoge tonen gelijkmatig over de zaal te verspreiden.

frequentie het uitgestraalde vermogen snel af). Zulk een relatief hoge resonantiefrequentie kan men verkrijgen, òf door een voldoend kleine conus te nemen, òf door achter de conus een voldoend klein afgesloten luchtvolume aan te brengen. Deze laatste methode heeft het voordeel dat de niet-lineaire vervorming er kleiner door wordt [10]); dit is vooral van belang wanneer de luidsprekers op vol vermogen moeten werken, zoals in de open lucht dikwijls het geval is. Het onderdrukken van het geluidsspectrum beneden 300 Hz doet aan de natuurlijkheid van spraak in het geheel geen afbreuk; integendeel, het herstelt de natuurlijke verhouding, doordat het een compensatie vormt voor het bij dalende frequentie afnemen van de demping der zaal.

Als men de zuil opbouwt uit kleine, afzonderlijk te richten luidsprekerkastjes, is de zuil volledig bij de zaal aan te passen en blijft de constructie toch eenvoudig. In het Palais de Chaillot is aan weerskanten van het toneel zulk een zuil aangebracht (*fig. 11* en *fig. 12*). Deze zuilen dienen voor stereofonische versterking van de spraak bij toneelvoorstellingen en voor stereofonische geluidseffecten die tevoren op een tweesporige magnetische band zijn opgenomen (zie deel II).

Bundelende luidsprekers worden niet alleen gebruikt in besloten ruimten, maar ook in de open lucht. *Fig. 13* geeft hiervan een spectaculair voor-

[10]) G. J. Bleeksma en J. J. Schurink, Een luidsprekerinstallatie voor zeer goede weergave in de huiskamer, Philips techn. T. **18**, 308-319, 1956, in het bijzonder blz. 314-316.

Fig. 13. „Evangelische Kirchentagung" op het vliegveld Rebstock bij Frankfort a.d. Main (1956). In de verticale balk van het 40 m hoge kruis waren luidsprekers gemonteerd. Deze vormden een geluidszuil van 30 m lengte. Over het gehele terrein van 20 ha, waarop zich ruim 300 000 personen bevonden, was de spreker goed verstaanbaar. Na afloop van de bijeenkomst heeft de installatie dienst gedaan voor het geven van verkeersaanwijzingen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

beeld. De bundeling heeft in een geluidsversterkingsinstallatie in de open lucht tweeërlei functie. In de eerste plaats komt het geleverde geluid volledig aan de luisteraars ten goede, zodat men het vermogen van versterkers en luidsprekers tot een minimum kan beperken. In de tweede plaats vermindert men geluidshinder voor de omgeving en storende reflexies tegen omringende gebouwen.

Behalve zuilen van conusluidsprekers, die het geluid bundelen in een schijfvormige ruimte, gebruikt men ook losse hoornluidsprekers, die het geluid bundelen in een kegel om de as. De openingshoek van de kegel is vrijwel dezelfde als die van een geluidszuil waarvan de lengte gelijk is aan de middellijn van de mond van de hoorn. Hoornluidsprekers paren een hoog rendement aan een uitstekende bescherming van het luidsprekersysteem tegen weersinvloeden. Voor muziekweergave echter hebben ze het nadeel dat de hoorn lage tonen afsnijdt beneden een bepaalde grensfrequentie, die bepaald wordt door de mate waarin de hoorn zich verwijdt. Om de afsnijfrequentie niet te hoog te doen zijn, moet de hoorn zich zeer geleidelijk verwijden. Hij zou dan onpraktisch lang worden. Daarom gebruikt men veelal gevouwen hoorns (*fig. 14*). Om met behoud van de voordelen van de hoornluidspreker het geluid verticaal nog extra te bundelen, maakt men in de open lucht soms gebruik van zuilen van hoornluidsprekers. Deze zijn bijzonder geschikt voor gevallen waarin het geluid een grote intensiteit en een grote dracht moet hebben, b.v. op de startbanen van vliegvelden en bij haveninstallaties.

Een bijzondere uitvoering van de hoornluidspreker is de meercellige hoornluidspreker (*fig. 15*), die in bioscopen als hogetonenluidspreker dient. De bundels van de cellen vullen gelijkmatig een wijde bundel, waardoor deze hoorn de hoge tonen binnen zijn openingshoek goed spreidt.

Soms is de voorziening met direct geluid door een centraal opgestelde bundelende luidsprekergroep onvoldoende. Hieronder volgen enige voorbeelden waarbij dit het geval is.

1) In de open lucht, a) bij een moeilijke vorm van het terrein, b) bij wind, waardoor het geluid als het ware wegwaait, en c) bij het optreden van een temperatuurgradiënt; dit verschijnsel kan er oorzaak van zijn dat de bundel zo ver omlaag of omhoog wordt gebogen dat hij de toehoorders niet meer bereikt (*fig. 16*).
2) In theaters waar de opening van de loges of de ruimte onder het balkon zo laag is dat het geluid van de luidsprekerzuilen naast het toneel te weinig tot deze plaatsen doordringt.

Fig. 14. Luidspreker met gevouwen hoorn.

3) In ruimten zoals grote kerken en fabriekshallen met relatief weinig toehoorders, zodat zelfs met een sterk bundelende luidsprekergroep nog te veel geluid op reflecterende oppervlakken zou vallen en er dus te veel nagalm zou ontstaan.

In zulke gevallen kan men voorzien door, in plaats van één centrale luidsprekergroep, een groter aantal luidsprekers met klein werkingsgebied te installeren, verspreid al naar de omstandigheden. De luidsprekers die bij een bepaalde gelegenheid overbodig zijn, schakelt men bij voorkeur uit, om niet meer nagalm te veroorzaken dan onvermijdelijk is.

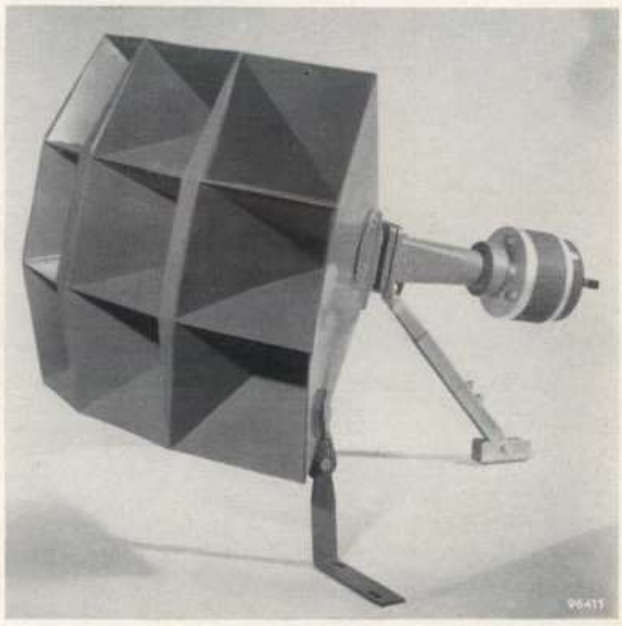


Fig. 15. Meercellige hoorn, veel in bioscopen gebruikt om de hoge tonen gelijkmatig te verspreiden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Daar waar de werkingsgebieden van de luidsprekers samenvallen, kunnen deze elkaar storen indien er plaatsen zijn waar ze niet alleen nagenoeg even luid zijn, maar bovendien met een tijdsverschil van meer dan 50 ms worden ontvangen. Dit gevaar bestaat vooral als men met verspreid opgestelde zuilen werkt. De storing kan worden opgeheven door de luidsprekers aan te sluiten via een vertragingsinrichting (zie beneden), die iedere luidspreker vertraagt overeenkomstig de looptijd van het geluid vanaf de bron naar die luidspreker (*fig. 17*). Een grote openluchtinstallatie waarin dit principe werd toegepast, ziet men in *fig. 18*. Deze methode is ook toegepast in de „Volkswagen" fabriek (zie deel II).

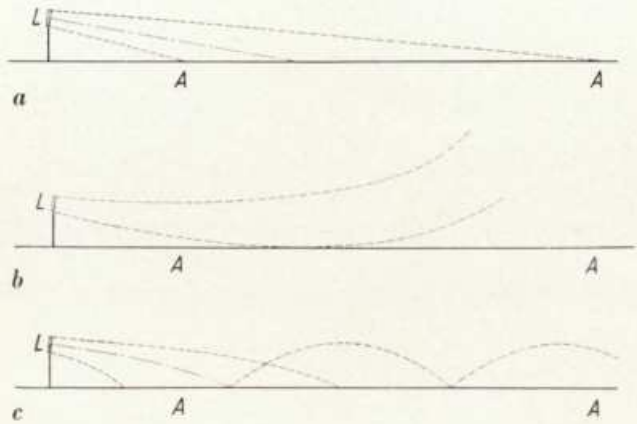


Fig. 16. Invloed van een temperatuurgradiënt op de richting van het geluid. *a*) Afwezigheid van een temperatuurgradiënt. De bundel van de luidsprekerzuil *L* is op het publiek *A-A* gericht. *b*) De temperatuur daalt met toenemende hoogte. Daar de snelheid van het geluid in warme lucht groter is dan in koude lucht, wordt de bundel naar boven afgebogen, zodat hij het publiek in het geheel niet bereikt. *c*) De temperatuur stijgt met toenemende hoogte. De bundel wordt naar beneden afgebogen en bereikt nog slechts het voorste deel van het publiek. Indien de grond goed reflecteert, wordt het geluid weer omhooggekaatst en verderop opnieuw omlaaggebogen; in zulke gevallen heeft het geluid een bijzonder grote dracht.

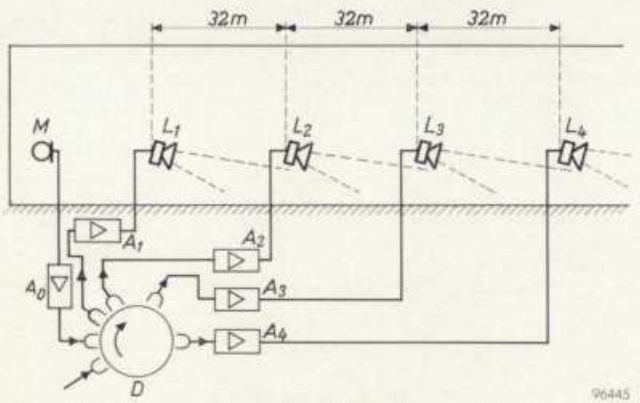


Fig. 17. Gedecentraliseerde luidsprekeropstelling voor het verstaanbaar maken van spraak in een lange fabriekshal met harde wanden. *M* microfoon. L_1, L_2, L_3 en L_4 zijn luidsprekerzuilen, die elk een vak van b.v. 32 m lengte bestrijken, overeenkomend met 100 ms looptijd van het geluid. Om te voorkomen dat de luidsprekers elkaar storen, wordt het elektrische signaal voor L_2 100 ms vertraagd ten opzichte van dat voor L_1, het signaal voor L_3 100 ms ten opzichte van dat voor L_2, enz. De vertragingsinrichting *D* wordt aanstonds besproken. $A_0 \ldots A_4$ versterkers.

Het is vaak gunstig, de vertragingen 10 tot 20 ms groter te maken dan met de plaats van de luidsprekers overeenkomt. In dit geval namelijk wordt de richtingsindruk, zoals we boven hebben gezien, steeds bepaald door het geluid dat het eerst aankomt, zelfs als dit tot ca. 10 dB zwakker is dan het geluid van de naastbijzijnde luidspreker. Op deze wijze blijft de natuurlijke stereofonie van de spreker (of van de toneelvoorstelling, of van de naast het toneel opgestelde stereofonische luidsprekerzuilen) bewaard voor de verderaf zittende toehoorders, die voornamelijk de vertraagde luidsprekers horen.

Indirect geluid

Om een zaal met een te korte nagalmtijd geschikt te maken voor muziek, moet men indirect geluid toevoegen. Daarbij is het probleem dat het natuurlijke indirecte geluid is samengesteld uit een enorm aantal reflexies van alle delen van de wanden, terwijl langs elekro-akoestische weg slechts geluid kan worden opgewekt door een beperkt aantal luidsprekers.

De methode waarop dit probleem door middel van stereonagalm is opgelost, is reeds in dit tijdschrift [3]) en elders [11]) beschreven. Daarom volstaan wij hier met het principe van een stereonagalminstallatie in het kort in herinnering te roepen. Boven het orkest hangt een microfoon *M* (*fig. 19*). Het signaal hiervan wordt door een opneemkop *0* magnetisch geregistreerd op de omtrek van een draaiend wiel *W*, het vertragingswiel. De registratie passeert achtereenvolgens vier weergeefkoppen *1...4* en een wiskop *5*; deze laatste zorgt ervoor dat de magnetiseerbare laag *m* telkens weer „schoon" onder de opneemkop komt. De signalen die in de weergeefkoppen worden geïnduceerd, zijn ten opzichte van het microfoonsignaal in verschillende mate vertraagd, afhankelijk van de snelheid van het wiel en van de afstand, langs de omtrek gemeten, tussen de opneemkop en de beschouwde weergeefkop. Elk van de weergeefkoppen is over een eigen versterker aangesloten op een groep luidsprekers, die op geschikte wijze over de zaal zijn verdeeld. De luidsprekers hebben tot taak, diffuus geluid te leveren. Om deze reden zijn ze rondom in de zaal aangebracht, zodanig dat ze zo weinig mogelijk direct op het publiek stralen. Door ieder van deze groepen de juiste intensiteit en klankkleur en de juiste vertraging te geven, en door elektrische terugkoppelingen

[11]) Zie de bijdrage van R. Vermeulen in het boek Musik, Raumgestaltung, Elektroakustik, onder redactie van W. Meyer-Eppler, uitg. Arsviva (H. Scherchen), Mainz 1955; voorts D. Kleis, Experimente zur Verbesserung der Raumwirkung von Schall, Elektron. Rdsch. **9**, 64-68, 1955.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

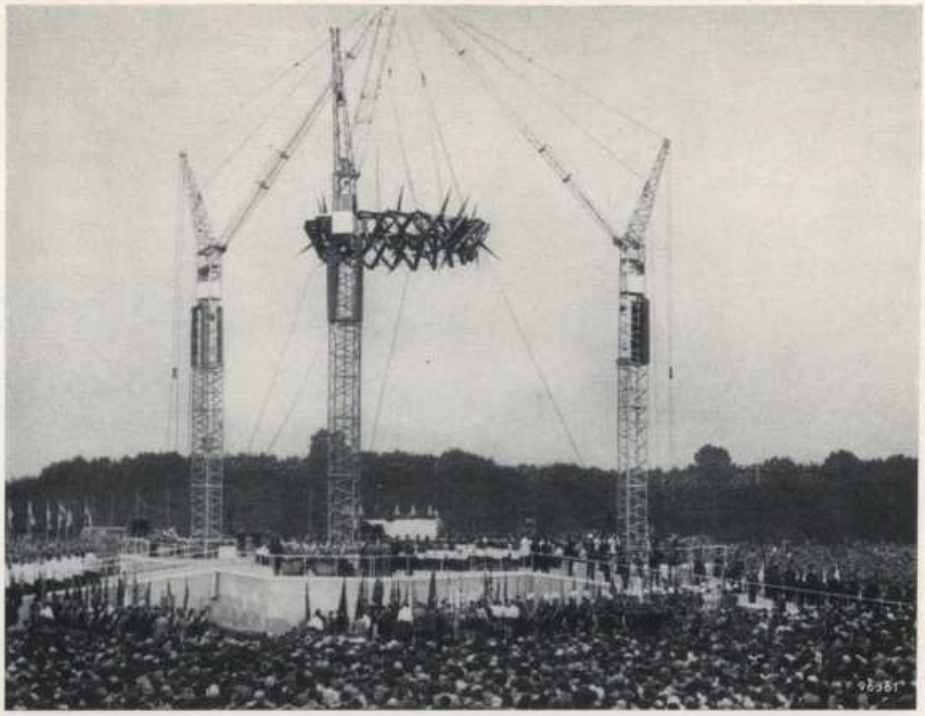


Fig. 18. „Katholische Kirchentagung" bij Keulen (1956), bijgewoond door ca. 800 000 personen. Aan een vakwerkconstructie hing boven het altaar een symbool van de doornenkroon. Hierin aangebrachte luidsprekers voorzagen de veraf gelegen delen van het terrein van geluid. De dichterbij gelegen gedeelten werden verzorgd door negen geluidszuilen, die aan de stalen kolommen waren opgehangen. Ter compensatie van het looptijdverschil tussen het geluid van de kroonluidsprekers en dat van de zuilen werd het signaal door de zuilen zoveel vertraagd dat beide geluiden tegelijk bij de toehoorders aankwamen.

vanaf de weergeefkoppen naar de opneemkop aan te brengen, kan men het gewenste effect bereiken. Het aldus opgewekte diffuse en vertraagde geluid vormt de nodige aanvulling op het indirecte geluid, dat door de zaalwanden in onvoldoende mate wordt verschaft. Het overgrote deel van het geluid kan

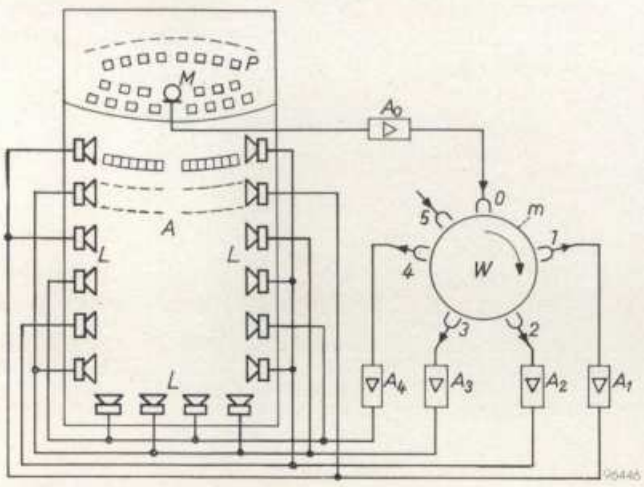


Fig. 19. Stereonagalminstallatie. *A* auditorium. *P* podium. *M* microfoon. *W* vertragingswiel, langs de rand waarvan magnetiseerbaar materiaal *m* is aangebracht. *0* opneemkop. *1...4* weergeefkoppen. *5* wiskop. $A_0 \ldots A_4$ versterkers. *L* luidsprekers. Vanaf de weergeefkoppen kan een elektrische terugkoppeling naar de opneemkop worden aangebracht (niet getekend).

daarbij afkomstig zijn van luidsprekers, zonder dat de toehoorders dit beseffen. De instelling van de apparatuur is vrij kritisch; overdrijving schaadt de natuurlijkheid en verraadt de aanwezigheid van de installatie. De ervaring heeft geleerd dat stereonagalm, mits de installatie goed wordt bediend, de uitvoering belangrijk in kwaliteit doet winnen en dat toneelspelers en musici van naam dit systeem hogelijk waarderen.

Een stereonagalminstallatie kan ook dienst doen om aan de toehoorders een zaal van grotere afmetingen te suggereren. In het onderschrift van *fig. 20* is toegelicht hoe men de vertragingen berekent die men aan de verschillende luidsprekers moet geven opdat de toehoorders de indruk krijgen, zich in een zaal van bepaalde afmetingen te bevinden.

Het gebrek aan een goede muziekakoestiek komt in het bijzonder tot uiting bij openluchtconcerten. Door het ontbreken van wandreflexies is de luidheid te gering en mist de muziek het ruimtelijke karakter, waardoor een uitvoering door een beroemd orkest de luisteraars vaak teleurstelt. Het is gebleken dat deze nadelen kunnen worden opgeheven door de uitvoering elektro-akoestisch te ondersteunen (*fig. 21*). Het directe geluid kan op peil worden gebracht door het orkest stereofonisch versterkt

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

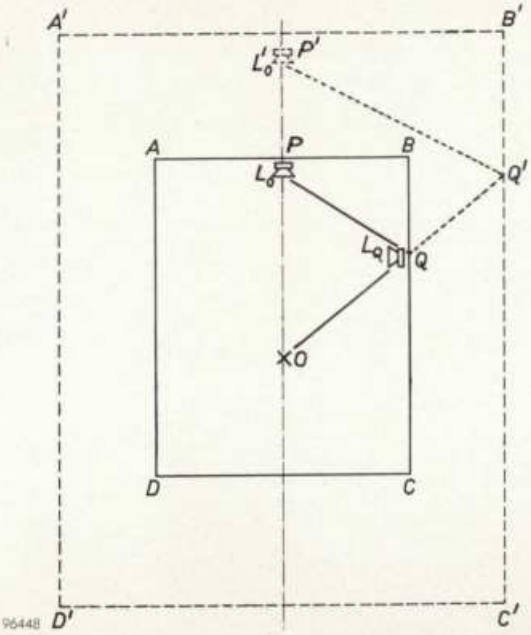


Fig. 20. Ter toelichting van de wijze waarop men berekent hoeveel in een stereonagalminstallatie een willekeurige luidspreker L_Q, ergens aan de wand van de zaal $ABCD$, moet worden vertraagd, 1) opdat een waarnemer O (eenvoudigheidshalve op de as van de zaal) de juiste indruk van de zaal krijgt, en 2) opdat aan de waarnemer een grotere zaal ($A'B'C'D'$) gesuggereerd wordt.
1) De luidspreker L_Q moet een reflexie in Q nabootsen van geluid dat van de bron L_0 in P komt. Het signaal voor L_Q moet dus zoveel vertraagd zijn als overeenkomt met de weg PQ, dus een tijd

$$\Delta t = \frac{PQ}{c},$$

als c de snelheid van het geluid is.
2) Ter suggestie van de grotere zaal moet L_Q de indruk wekken dat aan de denkbeeldige wand $B'C'$ in het punt Q' geluid wordt gereflecteerd dat afkomstig is van een denkbeeldige bron L_0' in P'. De vertraging van L_Q is nu bepaald door de weglengte $P'Q' + Q'Q$, verminderd met het stuk PP' (immers, de werkelijke bron bevindt zich nog altijd in P). Dus:

$$\Delta t = \frac{P'Q' + Q'Q - PP'}{c}.$$

Door de constructie te herhalen voor verschillende punten Q, vindt men de vertragingen die men aan de luidsprekers L_Q rondom in de zaal moet geven om de primaire reflexies van de grotere zaal te suggereren. Ten einde ook de meervoudige reflexies na te bootsen, moet men tussen deze luidsprekers nog andere aanbrengen en daaraan grotere vertragingen geven.
Van de plaats van het punt O hangen de uitkomsten van de constructie slechts weinig af.

weer te geven met behulp van luidsprekerzuilen naast of boven het podium. Door bovendien diffuus en vertraagd geluid toe te voegen, kan men de muziek rijker doen klinken, met het volle behoud van de aantrekkelijke sfeer die een concert in de open lucht eigen is. Het is aan te bevelen, daarbij alleen naar een verrijking van de klank te streven, en niet de akoestiek van een concertzaal als doel te stellen. Daar nagalm in wezen niet verenigbaar is met een openluchtuitvoering, is het in dit geval natuurlijker, in de vertragingsinstallatie geen terugkoppeling aan te brengen.

Fig. 21. Openluchtconcert door het Brabants Kamerorkest onder leiding van Evert van Tright op het voorplein van het Gouvernementsgebouw te 's-Hertogenbosch (juni en juli 1958). Boven het podium: luidsprekerzuilen ter stereofonische versterking van het directe geluid. Aan de gevel (en, niet zichtbaar op de foto, rondom in de bomen): luidsprekers die diffuus en vertraagd geluid toevoegen. Zonder de akoestiek van een concertzaal op te wekken, en met volledig behoud van de aantrekkelijke sfeer van een openluchtconcert, werd een opmerkelijk rijkere klank van de muziek verkregen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

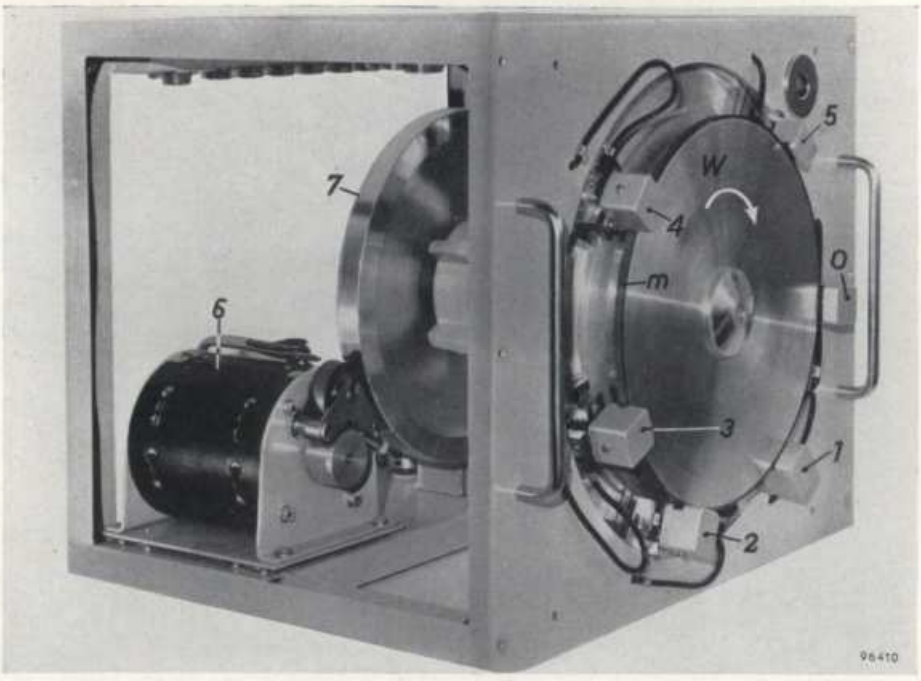


Fig. 22. Vertragingswiel *W* met magnetiseerbare rand *m*, opneemkop *0*, weergeefkoppen *1*, *2*, *3* en *4*, wiskop *5*, aandrijfmotor *6* en vliegwiel *7*. Dit aggregaat is een onderdeel van de stereonagalminstallatie EL 6910 (zie fig. 23).

De maximale vertraging voor de vierde weergeefkop bedraagt 0,25 of 0,5 s, al naar gelang het wiel een omtreksnelheid van 3 of 1,5 m/s heeft. Deze twee snelheden worden verkregen door verandering van het polen van de aandrijfmotor. Tussen de magnetiseerbare laag en de verschillende koppen bevindt zich een luchtspleet van ca. 20 μ, zodat er geen mechanisch contact tussen de laag en de koppen bestaat en de levensduur derhalve vrijwel onbeperkt is. De excentriciteit van het wiel is minder dan 1 μ, de ongelijkmatigheid in de snelheid minder dan 0,01%.

Het compenseren van looptijdverschillen van direct geluid, waarvan in het voorgaande sprake is geweest (fig. 17 en 18), geschiedt eveneens door middel van een vertragingswiel.

Fig. 22 toont het vertragingswiel in zijn tegenwoordige gedaante; het onderschrift vermeldt een aantal bijzonderheden. *Fig. 23* is een afbeelding van het complete stereonagalmapparaat type EL 6910.

Zijn in een zaal beide installaties aanwezig — één voor versterking van het directe geluid en één voor toevoeging van stereonagalm —, dan is men geheel onafhankelijk van de oorspronkelijke akoestiek van de zaal. *De geluidsinstallaties kunnen binnen wijde grenzen aan de zaal iedere akoestiek opleggen die men wenst.* Door de vertragingen van het indirecte geluid en de verhouding van direct tot indirect geluid op de juiste wijze te kiezen, kan men zowel de schijnbare grootte van de zaal als de schijnbare afstand van de geluidsbron tot de luisteraars — het „reliëf" — doen passen bij de omstandigheden. Zo is men in staat, in dezelfde zaal zowel voor spraak als voor

Fig. 23. Stereonagalminstallatie EL 6910 (links op de achtergrond) in de geluidscabine van het Palais de Chaillot. De nagalmtijd en, in ieder kanaal, de geluidssterkte en de klankkleur zijn instelbaar, zowel aan het apparaat zelf als op afstand, vanaf een centrale meng- en regeltafel. De versterkers zijn uitgerust met „Special Quality" buizen [12]) en hebben een frequentiekarakteristiek die tot op ca. 1 dB vlak is van 160 tot 12 000 Hz bij 3 m/s, en van 80 tot 8000 Hz bij 1,5 m/s omtreksnelheid van het vertragingswiel.

[12]) K. Rodenhuis, H. Santing en H. J. M. van Tol, Betrouwbaarheid en levensduur van professionele versterkbuizen, Philips techn. T. **18**, 145-157, 1956.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

muziek de gunstigste condities te scheppen. Bovendien kan men door regeling van de klankkleur van het indirecte geluid een bepaald wandmateriaal suggereren (steen, hout, enz.).

Microfoonopstelling

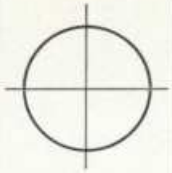
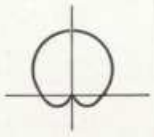
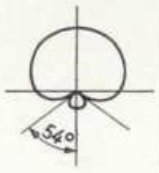
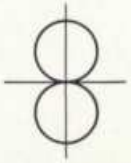
Evenals het plaatsen van luidsprekers, vormt het opstellen van de microfoons een akoestisch aanpassingsprobleem dat niet los van de zaal mag worden gezien.

Voor zover de microfoons dienen voor het maken van bandopnamen, bestemd om tijdens de voorstelling te worden weergegeven, of voor zover ze in een afzonderlijk vertrek staan, vanwaaruit muziek naar de zaal wordt overgebracht, kunnen ze worden opgesteld volgens de gebruikelijke studiotechniek. Er dient voor te worden gezorgd dat de microfoons voornamelijk het directe geluid opvangen en zo weinig mogelijk nagalm en stoorgeluid. Deze laatste komen nl. veel sterker tot uiting als ze door een luidspreker worden weergegeven dan wanneer men ze rechtstreeks hoort; in het eerste geval immers kunnen ze niet door het richtinghoren van het opgenomen directe geluid worden losgemaakt. (Om deze reden zijn omroepstudio's altijd meer gedempt dan zalen die voor uitvoeringen dienen.)

De microfoons die tijdens de uitvoering in de zaal staan, vangen in principe niet alleen het geluid van het toneel of het podium op, maar ook het geluid van de luidsprekers, het geruis van het publiek en de nagalm uit de zaal. Vangen de microfoons geluid op van luidsprekers die op deze zelfde microfoons zijn aangesloten, dan bestaat er een akoestische terugkoppeling. Deze is het sterkst voor die frequenties van het geluidsspectrum die met een bepaalde faze bij de microfoon aankomen. Dit leidt ertoe dat tonen met deze frequenties een extra-versterking ondervinden en dientengevolge een langere nagalm krijgen. Deze voorkeur voor bepaalde tonen en het naklinken ervan zijn bijzonder storende effecten, die het elektro-akoestische karakter van het geluid onmiddellijk verraden en de kwaliteit sterk benadelen. Deze effecten zijn des te storender naarmate de versterking verder wordt opgevoerd, waardoor bepaalde tonen steeds sterker naar voren komen en langer naklinken. Overschrijdt de versterking een bepaalde grens, dan gaat de installatie de meest geprononceerde voorkeurstoon blijvend onderhouden: de installatie „zingt rond". Dat dit laatste in de praktijk nog wel eens gebeurt, is uiteraard te wijten aan een grove bedieningsfout. Het naklinken van bepaalde tonen is een van de meest voorkomende klachten over geluidsinstallaties. In een goed gedimensioneerde installatie is het een onmiskenbare aanwijzing dat er op te grote luidheid is ingesteld, waarbij dan bovendien nog de eerder genoemde overdreven weergave van de lage tonen opvalt.

Het probleem om in theaterinstallaties akoestische terugkoppeling tot iedere prijs te voorkomen, wordt nog moeilijker doordat de microfoons onopvallend, vaak zelfs onzichtbaar, moeten worden opgesteld. Dit leidt ertoe dat de afstand van de microfoons tot de artiesten op het toneel of tot het orkest altijd vrij groot moet zijn. De enige manier om het doel te bereiken, is het gebruik van microfoons met duidelijke voorkeur voor geluid uit een bepaalde richting.

De bruikbaarheid van een microfoon in dit opzicht wordt uitgedrukt door de verhouding van de gevoeligheid in de voorkeursrichting tot de „rondomgevoeligheid". Voor „rondom gevoelige" microfoons is deze verhouding dus 0 dB; voor cardioïde- en bandmicrofoons is ze 5 dB, en voor hypercardioïdemicrofoons 6 dB (zie *tabel*).

Microfoontype	Richtingsdiagram	Gevoeligheid voorkeursrichting / gevoeligheid rondom
rondommicrofoon		0 dB
cardioïdemicrofoon		5 dB
hypercardioïdemicrofoon		6 dB
bandmicrofoon		5 dB

Om een nog betere verhouding te krijgen, stelt men wel microfoons samen tot een zg. microfoonzuil [13]). Het richtingsdiagram van een microfoonzuil is geheel analoog met het stralingsdiagram van een luidsprekerzuil. De voorkeursrichtingen

[13]) Philips techn. T. **17**, 227, 1955, fig. 5 en 6.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zijn in hoofdzaak gelegen binnen een schijfvormig gebied aan weerszijden van het middenloodvlak van de zuil, met een openingshoek die afneemt met toenemende lengte van de zuil en met stijgende geluidsfrequentie.

Een andere oplossing vormt de zg. „hogereordemicrofoon", bestaande uit twee microfoons die dicht bij elkaar zijn gemonteerd met de membranen onderling evenwijdig, en die tegen elkaar in zijn geschakeld. Dit leidt tot een verscherpt richtingseffect, evenwel ten koste van de gevoeligheid voor lage tonen. Dit laatste is echter, zoals we boven hebben gezien, in vele gevallen eerder een voordeel dan een nadeel.

Door het gebruik van scherp op het toneel gerichte microfoons wordt niet alleen de akoestische terugkoppeling verzwakt, maar wordt ook minder geluid van het publiek en minder nagalm van de zaal opgevangen.

De beste plaats om microfoons op een toneel op te stellen, is dikwijls de voorrand van het toneel. Daar de microfoons dan niet dichter dan 1,5 m kunnen worden benaderd, hebben de artiesten een grote vrijheid van beweging, zonder dat dit gepaard gaat met merkbare sterkteverschillen in het luidsprekergeluid. Dit draagt veel bij tot het wekken van een natuurlijke indruk.

De microfoonopstelling die, met inachtnemen van bovengenoemde overwegingen, de beste is voor het gelijkmatig (al of niet stereofonisch) opvangen van het geluid van toneel, podium of orkestbak, wordt verder bepaald door de plaatselijke omstandigheden. In deel II zullen wij enige opstellingen in bestaande geluidsinstallaties nader bespreken.

Samenvatting. De moderne geluidstechniek is gebaseerd op eigenschappen van het gehoor en op de akoestische eigenschappen van zalen. Van beide wordt een samenvattend overzicht gegeven. In vele zalen beantwoordt de akoestiek niet aan het doel waarvoor de zaal is bestemd. Ook komt het vaak voor dat aan de zaalakoestiek tegenstrijdige eisen worden gesteld, b.v. indien een zaal nu eens voor toneel, dan weer voor concerten moet dienen. In zulke gevallen kan uitkomst worden verkregen door een combinatie van twee elektro-akoestische installaties, die samen de algehele beheersing van de zaalakoestiek veroorloven. De ene installatie dient ter stereofonische versterking van het directe geluid, dat door bundelende luidsprekers op het publiek wordt gericht. Met de andere installatie wordt indirect (diffuus) geluid toegevoegd (stereonagalm). Door regeling van de nagalmtijd van het indirecte geluid kan men de toehoorders suggereren dat zij zich in een veel grotere zaal bevinden. Verdere ondersteuning van toneel- en operaopvoeringen kan worden verkregen door middel van „panoramisch geluid" (van rondom of van boven komend direct geluid, b.v. effectgeluiden). Geluidsinstallaties voor grote openluchtbijeenkomsten en voor openluchtconcerten komen ook ter sprake. Aan het slot wordt de opstelling van de microfoons behandeld.

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLIKATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publikaties, voor zover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven, op aanvrage overdrukken.

2554: J. A. Kok en M. M. G. Corbey: Dipoles and electric breakdown (Appl. sci. Res. **B 6**, 449-455, 1957, no. 6).

In vroegere publikaties van de auteurs (deze overzichten nos. **2306**, **2444** en **2478**) is aangetoond dat doorslag van isolatiemateriaal of diëlektrica kan worden veroorzaakt doordat polariseerbare deeltjes naar plaatsen van maximale veldsterkte worden getrokken. Deze deeltjes vormen daar een brug, waarlangs doorslag plaatsvindt. In het onderhavige artikel betrekken de auteurs ook permanente dipolen in hun beschouwingen. De conclusie is dat ook deze tot doorslag aanleiding kunnen geven.

2555: F. L. H. M. Stumpers: Information theory and international radio organizations (IRE Trans. on Information Theory **IT-3**, 85, 1957, no. 2).

Beschouwing over de toepassing der informatietheorie bij radiocommunicatie. Kort overzicht van de desbetreffende programmapunten van C.C.I.R. en U.R.S.I.

2556: J. A. Kok: Doorslagverschijnselen in vloeibare isolatoren (Ingenieur **69**, E 179-E 181, 13 dec. 1957).

De elektrische doorslagvastheid van olie is kleiner naarmate de afmetingen van in de olie aanwezige vreemde deeltjes groter zijn. Het theoretische verband tussen de doorslagvastheid en de afmetingen der deeltjes is experimenteel geverifieerd door metingen aan colloïdale suspensies van deeltjes met bekende afmetingen. De doorslagvastheid van een oliesoort daalt als de aanwezige deeltjes zich tot grotere deeltjes samenvoegen. Of zij dit doen, hangt ervan af of de aantrekkende krachten (London-Van der Waals-krachten) dan wel de afstotende krachten (afkomstig van de ionenwolken die de deeltjes om zich heen hebben) overheersen. Een minerale olie is geschikt voor isolatiedoel-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

einden als de afmetingen van de vreemde deeltjes beneden een zekere grootte blijven. Voor deeltjes met een diameter groter dan 500 Å nemen namelijk de London-Van der Waals-krachten zeer snel af.

2557: J. Meltzer: Insektizide und akarizide Wirksamkeit von 2, 4, 5, 4′-Tetrachlor-Diphenyl-Sulphon (Tedion) (Z. ang. Entomologie **41**, 58-63, 1957, no. 1).

Beschrijving van proeven waaruit blijkt dat „Tedion" voor insekten noch als contactvergif, noch als maagvergif werkzaam is. „Tedion" is een specifiek acaricide (werkzaam tegen mijten) dat voor mens en huisdier ongevaarlijk is, dat de bijen niet schaadt, en dat ook de natuurlijke vijanden van de mijten niet deert. (Zie ook Philips techn. T. **17**, 120-127, 1955.)

2558: J. Meltzer: Penetratie en werkingsduur van enkele spintoviciden (Meded. Landbouwhogesch. Opzoekingsstat. Gent **22**, 457-464, 1957, no. 3).

Van de vier onderzochte spintoviciden „Chlorbenside" (p-chloorfenyl-p-chloorbenzylsulfide), „Tedion" (2,4,5,4′-tetrachloordifenylsulfon), CPCBS (p-chloorfenyl-p-chloorbenzeensulfonaat) en CPBS (p-chloorfenylbenzeensulfonaat), blijkt het laatste het snelst in de behandelde bladeren door te dringen, maar het verliest ook het snelst zijn werkzaamheid. Alleen „Tedion" is twee weken na de behandeling nog zeer werkzaam. Van veel belang is de maaggifwerking van „Tedion", dat door de mijten en hun larven uit het blad wordt opgenomen; de vrouwelijke dieren leggen dan slechts steriele eieren, en de larven sterven.

2559*: M. van Tol: Automatische regeling van kernreactoren (Ontwikkelingen in de moderne regeltechniek, Verslag van de leergang georganiseerd door de Sectie voor Regeltechniek van de Afd. T.W.O. van het Kon. Inst. van Ingenieurs op 2, 3 en 4 okt. 1957 te Utrecht, blz. 87-101, 1957).

Uitgaande van een kleine verplaatsing van een regelstaaf, wordt de responsiekromme van een kernreactor afgeleid voor zover deze door de neutronenhuishouding wordt bepaald; op thermische effecten wordt niet ingegaan. De gevonden kromme bevat, in combinatie met de bekende frequentie- en fazekarakteristieken van de regelapparatuur, de frequentiekarakteristiek van de gehele regelkring. Men kan dan nagaan welke eisen men aan een in de kring opgenomen automatische regelaar moet stellen om een stabiele automatische regeling te verkrijgen. Zie ook Philips techn. T. **19**, 253-265 en 289-301, 1957 (nos. 9 en 10).

2560: J. A. Hartveld: Moderne Fahrzeugbeleuchtung mit Fluoreszenzlampen (Elektrizitätsverwertung **32**, 213-224, 1957, no. 6-7).

Overzicht van de verschillende soorten fluorescentielampen en schakelingen die zijn ontwikkeld voor gebruik in treinen, trams, trolleybussen en autobussen, zowel voor voeding uit accumulatoren als — voor zover het treinen, trams en trolleybussen betreft — uit het net. Bij voeding uit accubatterijen van lage spanning (24 V) zijn roterende kwikomzetters in combinatie met transformatoren het doelmatigst om de gewenste voedingsspanning op te wekken. Bij gebruik van „TL" lampen van 40 watt kan men dan 42 lumen per watt verkrijgen. Beschikt men over accubatterijen die 72 V leveren, dan kan men het best „TL" C-lampen van 15 watt rechtstreeks aansluiten; men krijgt dan 30 lumen/watt. Voor een batterijspanning van 110 V is de „TL" C-lamp van 20 watt ontwikkeld. Als het vermogen rechtstreeks uit het net wordt betrokken, kan men gelijkspanningen hebben van 550, 600, 1500 of 3000 V, of wisselspanningen van 15 000 V bij $16\frac{2}{3}$ Hz of 25 000 V bij 50 Hz. Voor gelijkspanning is de „TL" R-lamp ontwikkeld. Bij een wisselspanning van 25 000 V bij 50 Hz kan de spanning omlaag getransformeerd worden, waarna „TL" S-lampen van 20 watt kunnen worden aangesloten. Bij wisselspanningen van $16\frac{2}{3}$ Hz kunnen fluorescentielampen niet rechtstreeks worden aangesloten, omdat dan hinderlijke flikker zou optreden; men neemt in zo'n geval weer zijn toevlucht tot accumulatoren. Bij toepassing van wisselstroomgeneratoren met variërende frequentie zijn „TL" C-lampen van 20 watt het doelmatigst. Ten slotte doet de auteur enige aanbevelingen betreffende de keuze van de verlichtingssterkte en de kleur van het licht en bespreekt hij de eisen gesteld aan de armaturen en hun opstelling in de voertuigen. (Zie ook Philips techn. T. **18**, 28-35, 1956.)

2561: F. K. Lotgering en E. W. Gorter: Solid solutions between ferromagnetic and antiferromagnetic compounds with NiAs structure (Phys. Chem. Solids **3**, 238-249, 1957, no. 3-4).

Onderzoek van vier series mengkristallen van een ferromagnetische met een antiferromagnetische stof. Het betrof de mengkristallen: $CrTe_{1-x}Se_x$ (*a*), $Mn_{1-x}Cr_xSb$ (*b*), $CrTe_{1-x}Sb_x$ (*c*) en $Cr_{1-x}Mn_xTe$ (*d*). Voor $x = 0$ krijgt men de zuiver ferromagnetische, en voor $x = 1$ de zuiver antiferromagnetische stof.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Alleen in geval (*d*) trad geen volledige mengbaarheid op. Als functie van de temperatuur werd voor iedere onderzochte samenstelling de verzadigingsmagnetisatie gemeten in het temperatuurgebied van 20 °K tot aan de Curie-temperatuur. In het gebied vanaf de Curie-temperatuur tot 850 à 1100 °K werd de susceptibiliteit gemeten. Als functie van de samenstelling x werden de Curie-temperatuur en de Néel-temperatuur (hierbij gaat de antiferromagnetische ordening verloren) uitgezet. In de gevallen (*b*) en (*c*) neemt de Curie-temperatuur af als x vanaf 0 toeneemt, en de Néel-temperatuur neemt af als x vanaf 1 afneemt. Curie- en Néel-temperatuur worden niet nul voor dezelfde waarde van x. Speciaal bij mengkristallen volgens (*b*) is gebleken dat voor zekere waarden van x niet alleen een Curie-temperatuur, maar ook een, hoger gelegen, Néel-temperatuur optreedt. In allebei de gevallen (*b*) en (*c*) neemt de verzadigingsmagnetisatie af als functie van x, maar niet op dezelfde manier. Men kan de waargenomen verschijnselen verklaren als men aanneemt dat de rechtstreekse plaatsruilwisselwerking tussen de magnetische metaalatomen overheerst wordt door een zg. superplaatsruilwisselwerking tussen deze atomen, die via een metalloïde-atoom tot stand komt.

A 2: E. Kauer en A. Rabenau: Über den Bandabstand von Galliumnitrid und Aluminiumnitrid (Z. Naturf. **12a**, 942-943, 1957, no. 11).

Korte mededeling over de bepaling van het energieverschil tussen geleidingsband en valentieband in galliumnitride en aluminiumnitride aan polykristallijne monsters, door middel van metingen van de diffuse reflectie als functie van de golflengte van de opvallende straling. Voor galliumnitride werd bij kamertemperatuur 3,2 eV gevonden, voor aluminiumnitride moet de waarde groter zijn dan 5 eV.

A 3: A. Rabenau en P. Eckerlin: Die K_2NiF_4-Struktur beim La_2NiO_4 (Acta cryst. **11**, 304-306, 1958, no. 4).

Verslag van een röntgendiffractie-onderzoek naar de structuur van La_2NiO_4 door Debye-Scherrer-opnamen met Cu $K\alpha$-straling. La_2NiO_4 blijkt een structuur te vertonen die verwant is met die van perofskiet en die reeds eerder werd waargenomen bij K_2NiF_4 en daaraan bestudeerd door Balz en Plieth. Voor de roosterconstanten van het tetragonale La_2NiO_4 werd gevonden: $a = 3{,}855 \pm 0{,}001$ Å en $c = 12{,}652 \pm 0{,}003$ Å. Ook bij La_2CoO_4 werd de La_2NiO_4-structuur geconstateerd, maar hier was deze orthorombisch gedeformeerd. De roosterconstanten waren: $a = 5{,}539$ Å, $b = 12{,}66$ Å, $c = 5{,}482$ Å.

R 347: A. van Weel: Analysis of diode-detector circuits for signals with asymmetrical sidebands (Philips Res. Repts. **13**, 301-326, 1958, no. 4).

Theoretische analyse van een detectortrap met een diode voor een gemoduleerd signaal met asymmetrische zijbanden en met een draaggolf die is verstemd ten opzichte van de centrale frequentie van het middenfrequentiegedeelte. Het vervangingsschema blijkt een schakeling te zijn met drie klemmenparen. Deze zespool bevat een serieschakeling van drie impedanties. Bij de modulatiefrequentie hebben de eerste en de tweede dezer impedanties de waarden die de impedantie van het middenfrequentiegedeelte heeft bij resp. de frequentie van de bovenzijband en van de onderzijband, terwijl van de derde impedantie dan de waarde gelijk is aan die van de impedantie van het audiogedeelte bij de modulatiefrequentie. Uit metingen blijkt dat de karakteristiek die de amplitude van de laagfrequente uitgangsspanning geeft als functie van de modulatiefrequentie, gemeten bij een zekere verstemming van de draaggolffrequentie ten opzichte van de centrale frequentie van het middenfrequentiegedeelte, verschillend is voor verstemmingen die alleen in teken verschillen. De oorzaak hiervan blijkt te liggen in een asymmetrie van de stroomimpulsen welke door de detector vloeien.

R 348: K. F. Niessen: Non-magnetic ions in an antiferromagnetic (Philips Res. Repts. **13**, 327-334, 1958, no. 4).

Theoretische behandeling van een antiferromagneticum waarin een betrekkelijk geringe fractie van de magnetische ionen in de beide deelroosters is vervangen door niet-magnetische ionen. Nagegaan wordt de invloed die deze substitutie heeft op verschillende meetbare grootheden zoals de spontane magnetisatie, de susceptibiliteiten voor de richtingen evenwijdig met en loodrecht op deze spontane magnetisatie, de kritische veldsterkte en de antiferromagnetische resonantiefrequentie. De auteur laat zien hoe men, door deze grootheden te meten, een aantal constanten die in de theorie zijn ingevoerd, numeriek zou kunnen berekenen.

R 349: H. J. Oskam: Microwave investigation of disintegrating gaseous discharge plasmas (Philips Res. Repts. **13**, 335-400, 1958, no. 4).

Eerste gedeelte van 's schrijvers proefschrift

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

(Utrecht, november 1957, zie voor het vervolg no. **R 350** van deze overzichten) over een theoretisch en experimenteel onderzoek naar het verdwijnen van elektronen uit een wegstervend gasontladingsplasma. De eerste hoofdstukken bevatten theoretische beschouwingen over: 1) het complexe geleidingsvermogen van een plasma bij hoge frequenties, 2) de invloed die de verschillende verdwijningsprocessen hebben op de elektronendichtheid als functie van de tijd, 3) het verband tussen de geleidingscoëfficiënt (d.i. de complexe verhouding tussen stroomdichtheid en veldsterkte) van een plasma en de eigenschappen van drie verschillende typen van trilholten. Aangezien het meetsignaal (frequentie 10^{10} Hz) de energie der elektronen niet mag vergroten, moest dit signaal beperkt blijven tot enkele microwatts. De auteur licht toe hoe men de gasontladingsvaten moet construeren en behandelen. Het blijkt dat in helium, zelfs bij een gasdruk van 25 mm Hg, de elektronen uit het plasma verdwijnen door ambipolaire diffusie, en niet door recombinatie. De beweeglijkheid van de He_2^+-ionen in helium (gereduceerd op 760 mm Hg en 0 °C) bedraagt $17{,}3 \pm 0{,}7$ cm/sec per volt/cm. In neon met een druk van 20 mm Hg verdwijnen de elektronen echter uit het plasma door dissociatieve recombinatie met Ne_2^+-ionen (recombinatiecoëfficiënt $\alpha \approx 2{,}5 \times 10^{-7}$ cm³/sec). Toevoeging van edelgasatomen met een lagere ionisatiespanning dan die van het hoofdgas blijkt een zeer grote invloed te hebben op de verdwijning van de elektronen uit het plasma. Er werden metingen verricht aan binaire gasmengsels bestaande uit helium met geringe hoeveelheden neon, argon of krypton, en ook aan neon-argon en neon-krypton. Gebleken is dat in al deze gvallen, zelfs bij zeer geringe concentraties van het bijmengsel, aanzienlijke hoeveelheden atoomionen van het bijmengsel ontstaan. In helium-neonmengsels ontstaan deze ionen door afgifte van lading door een heliummolecuulion aan een neonatoom; de werkzame doorsnede voor deze reactie is $Q_{ce} \approx 15{,}5 \times 10^{-15}$ cm². In de andere mengsels ontstaan atoomionen van het bijmengsel door het Penning-effect, en mogelijk ook door een ladingsafgifte als hierboven besproken. De gedane metingen laten geen onderscheiding toe tussen de beide mogelijkheden. In alle onderzochte mengsels blijken atoomionen van het bijmengsel te worden omgezet in molecuulionen door een drievoudige botsing met een atoom van het hoofdgas en een atoom van het bijmengsel. De waarschijnlijkheid van het optreden van dit proces hangt sterk af van het verschil tussen de ionisatiespanning van het hoofdgas en die van het bijmengsel; in het helium-neonmengsel is deze waarschijnlijkheid het grootst. De metingen wijzen erop dat bovendien een omzetting van Ne-atomen in $(NeHe)^+$-ionen geschiedt door drievoudige botsingen met twee He-atomen.

Verschenen zijn:

D. A. Snel: Magnetische geluidsregistratie; theorie en praktijk van het opnemen en weergeven (Philips' Technische Bibliotheek 1958, XII + 220 blz., 155 figuren in de tekst en 37 foto's buiten de tekst).

Dit eerste uitgebreide werk in de Nederlandse taal over magnetische geluidsregistratie omvat 23 hoofdstukken, die als volgt zijn getiteld: I. Inleiding, II. Het geluid vastgelegd, III. Recorders voor de huiskamer, IV. Magnetisme en elektriciteit, V. Inleiding tot het magnetiseringsproces, VI. Het magnetiseringsproces, VII. Het mechanisme van de recorder, VIII. Band en koppen, IX. Magnetische koppen, X. Magnetisch band, XI. Het versterkergedeelte, XII. Luidsprekers, XIII. Microfoons, XIV. Het opnemen in de praktijk, XV. Het weergeven in de praktijk, XVI. De dicteermachine, XVII. Naar betere kwaliteit, XVIII. Amateurfilms met magnetisch geluid, XIX. Storingen, XX. Professionele apparatuur, XXI. Toepassingsmogelijkheden, XXII. Algemeen onderwijs en muziekstudie, XXIII. Diversen. Een lijst waarin een aantal termen worden verklaard, en een index besluiten het boek.

R. van der Veen en G. Meijer: Licht und Pflanzen (Philips' Technische Bibliotheek 1958, XII + 164 blz., 92 figuren).

De eerste vijf hoofdstukken van bovengenoemd boek geven een inzicht in de processen die in planten door licht worden teweeggebracht; het zesde hoofdstuk behandelt de praktische toepassing van plantenbestraling. De titels van de hoofdstukken zijn: I. Die Lichtmessung bei der Pflanzenbestrahlung, II. Photosynthese, III. Phototropismus, Phototaxis und Photonastie, IV. Photoperiodismus, V. Der Einfluß der Lichtfarbe, VI. Anwendung von Kunstlicht. Hierna volgen nog een literatuurlijst en een register. Een Engelse uitgave van het boek is in voorbereiding.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!